

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний
(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів
(повна назва кафедри)

УДК 535.42

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ В. Г. Колобродов
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2019р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва спеціальності)

на тему: Дифракційна лінза із заданими характеристиками

Виконав: студент __6__ курсу, групи ПО-82 мп
(шифр групи)

_____ Чікіда Олексій Ігорович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ ас.каф.ООЕП, к.т.н., Васильковська І.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант стартап-проект _____ д.е.н., доцент, Бояринова К.О. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

РЕФЕРАТ

ДИФРАКЦІЙНА ЛІНЗА ІЗ ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Обсяг роботи – 83 сторінки

Кількість ілюстрацій – 39

Кількість таблиць – 24

Кількість додатків – 0

Кількість джерел за переліком посилань – 38

Актуальність. Дифракційні оптичні елементи – дифракційні лінзи (ДЛ) – використовують для проектування об'єктивів, окулярів, інтраокулярних лінзах тощо. Їх використовують як альтернативний спосіб корекції, в першу чергу, хроматичних та інших аберацій оптичних систем. ДЛ компактніші у порівнянні із рефракційними лінзами, тому системи, побудовані з їх використанням, мають менші габаритні розміри та вагу. Особлива увага приділяється проектуванню інфрачервоних ДЛ, оскільки це сприяє вирішенню проблеми обмеженості оптичних матеріалів, прозорих в інфрачервоній області спектра.

На сьогодні проектування рефракційно-дифракційних систем обмежується використанням ДЛ для корекції хроматичних чи термічних аберацій оптичних систем. Зазвичай, такі ДЛ є параксіальними та мають малі відносні отвори, тому суттєво не впливають на оптичну силу оптичної системи. Тому наступним етапом розвитку проектування рефракційно-дифракційних оптичних систем є використання непараксіальних ДЛ, які можуть бути використаними для корекції монохроматичних аберацій, що є актуальною задачею.

Мета дослідження: розробка методу проектування дифракційної лінзи із заданими характеристиками.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати відомі методи проектування дифракційних лінз та обрати найбільш ефективний для його подальшого використання.
2. Розробити метод проектування дифракційної лінзи

3. Виконати експериментальну перевірку запропонованого методу шляхом розрахунку оптичних систем з дифракційними лінзами та порівняти з їх аналогами де лише рефракційні.

Об’єкт дослідження: методи проектування дифракційних лінз.

Предмет дослідження: метод проектування дифракційної лінзи що скорегує аберації в рефракційній ОС.

Публікації:

1. Чікіда О.І. Перспективні дифракційні технології / І. О. Вовчок, О. І. Чікіда. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 67–69.

2. Чікіда О.І. Сучасний стан ринку дифракційних лінз / О. І. Чікіда, І. О. Вовчок. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 92–94.

За матеріалами магістерської дисертації було опубліковано два матеріали конференції у збірнику праць конференції.

Ключові слова: *дифракційна лінза, метод проектування, сферична аберація, хроматична аберація.*

ABSTRACT

DIFFRACTION LENS WITH SPECIFIED CHARACTERISTICS

Number of pages – 83

Number of figures – 39

Number of tables – 24

Number of applications – 0

Number of references – 38

Topic relevance. Diffractive Optical Elements - Diffraction Lenses (DL) - Used to design objectives, eyeglasses, intraocular lenses, and more. They are used as an alternative method of correction, first of all, chromatic and other aberrations of optical systems. DLs are more compact than refractive lenses, so systems built with them are smaller in size and weight. Particular attention is paid to the design of infrared DLs, since it helps to solve the problem of limited optical materials transparent in the infrared region of the spectrum.

Today, the design of refractive-diffraction systems is limited to the use of DL for the correction of chromatic or thermal aberrations of optical systems. Usually, such DLs are paraxial and have small relative openings, so they do not significantly affect the optical power of the optical system. Therefore, the next stage in the development of the design of refractive-diffraction optical systems is the use of non-paraxial DLs, which can be used to correct monochromatic aberrations, which is an actuality task. Therefore, it would be desirable to develop simple and efficient design method of diffractive optical element in optical systems.

Research goal development of a method of designing a diffraction lens with specified characteristics.

Research objectives:

1. To analyze known methods of designing diffractive lenses and to choose the most effective for its further use.
2. To develop a method of designing a diffraction lens
3. Perform an experimental verification of the proposed method by calculating optical systems with diffractive lenses and compare with their counterparts where only refractive lenses.

Object of research methods of designing process diffractive lenses.

Subject of research is the method of designing a diffractive lens that adjusts aberrations in a refractive OS.

Keywords: *diffraction lens, design method, spherical aberration, chromatic aberration.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ДИФРАКЦІЙНІ ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ В СУЧАСНОМУ ПРИЛАДОБУДУВАННІ	12
1.1 Класифікація дифракційних оптичних елементів	12
1.2 Основні характеристики дифракційних оптичних елементів	18
1.3 Актуальність методів проектування дифракційних лінз	19
1.4 Сучасний стан ринку ДОЕ	22
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ.....	25
2.1 Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні геометричної оптики.....	25
2.2 Проектування асферичних лінз Френеля із сферичним профілем	25
2.3 Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні теорії дифракції	29
2.4 Проектування дифракційних лінз із заданими коефіцієнтами пропускання	30
2.5 Метод ахроматизації ДЛ шляхом проектування її як багатопорядкової ...	41
2.6. Метод корекції сферичної аберації гібридної лінзи.....	46
Висновки до розділу 2	52
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	54
3.1 Проектування інфрачервоного гібридного об'єктива	54
3.2. Проектування багатопорядкової дифракційної лінзи для роботи в ІЧ діапазоні	61
Висновки до розділу 3	63
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	64
4.1 Опис ідеї проекту	64
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	66
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	67
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	73
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	75
Висновки до розділу 4	79

	9
ВИСНОВКИ	80
Список літератури.....	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДОО – дифракційний оптичний елемент

ДЛ – дифракційна лінза

ДЕ - дифракційна ефективність

ІЧ - інфрачервоний

ОС- оптична система

БПДЛ - Багатопорядкова дифракційна лінза

МДФ – модуляційна передавальна функція

ВСТУП

Сьогодні дифракційна оптика – це галузь досліджень, що швидко розвивається. Продовжують з'являтися доповіді конференцій та спеціальні випуски оптичних журналів, в яких публікуються авторитетні оцінки сучасного стану та ствердження щодо майбутніх перспектив дифракційної оптики. Цьому сприяють декілька факторів. Зокрема, дифракційні оптичні елементи дозволяють маніпулювати світловими полями таким чином, як раніше було неможливим з традиційною заломлюючою та відбиваючою оптикою. Крім того, дифракційні оптичні елементи можуть бути дешевшими та легкими у виробництві.

Завдяки своєму багатому функціоналу дифракційні лінзи (ДЛ) мають високий потенціал у системах формування зображень. Вони здатні частково або повністю замінити рефракційну оптику через свої багатогранні можливості. Їх переважно використовують для зменшення габаритів й маси об'єктивів. За рахунок дифракції світлового потоку на неперервному мікрорельєфі поверхні лінзи може досягатися ефект біфокальності у дифракційно-рефракційних лінзах. При використанні ДЛО стає можливим проектування гібридних елементів для отримання ахроматичних скоригованих елементів за рахунок того, що дифракційні поверхні мають від'ємний коефіцієнт дисперсії.

Головною проблемою фокусаторів якими являються ДЛ є досягнення високої енергетичної ефективності при формуванні потрібного розподілу інтенсивності у фокальній площині.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі оптичних та оптико-електронних приладів за напрямком дослідження «Дифракційна лінза із заданими характеристиками» згідно з тематикою державних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України з планами науково-дослідних робіт кафедри ООЕП.

РОЗДІЛ 1

ДИФРАКЦІЙНІ ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ В СУЧАСНОМУ ПРИЛАДОБУДУВАННІ

1.1 Класифікація дифракційних оптичних елементів

Дифракційними оптичними елементами (ДОЕ) у вітчизняній та зарубіжній літературі називають оптичні елементи, які здійснюють перетворення фронту падаючої хвилі в результаті дифракції світла на мікроструктурі елемента, виконаного на поверхні заданої форми. Класифікують ДОЕ по типу дифракційної структури, за формою поверхні, на якій вона виконана, і по виду здійснюваного перетворення хвильового фронту. Дифракційна структура може працювати на пропускання або відбиття, просторово модулюючи амплітуду або фазу падаючої на неї хвилі. У загальному випадку (як і в найпростішому випадку дифракційної решітки) в результаті дифракції падаюча хвиля розщеплюється на кілька хвиль (дифракційних порядків), що поширюються в різних напрямках і відрізняються як за інтенсивністю, так і за формою хвильового фронту. При цьому дифраговані промені (перпендикуляри до фронтів дифрагованих хвиль) розміщуються з обох сторін від променів нульового порядку, що поширюються в напрямку падаючої хвилі (у разі структури, що працює на пропускання) або дзеркально відображеної хвилі (у разі структури, що працює на відбивання). Порядки дифракції відраховують від нульового, вважаючи позитивними порядки, розташовані на одному боці від нульового, і негативними – розташованими на іншому. Вибір знаку, звичайно, умовний.[1]

Історично першими ДОЕ, що лежать в основі двох основних класів таких елементів, є плоскі дифракційні решітки зі структурою прямолінійних і рівновіддалених один від одного штрихів і кільцеві зонні пластинки Френеля. [1]

Принцип дії дифракційної решітки був відкритий в 1785 році Рітенхаузом. Однак це відкриття залишилося непоміченим, і повторно ґратка була винайдена в 1819 році Фраунгофером, який створив також технологію їх виготовлення. Значних успіхів в техніці виготовлення дифракційних ґраток

досяг Роуланд, який створив досить досконалі для того часу гравіювальні машини і винайшов так звану ввігнуту ґратку [2]. Сьогодні в клас дифракційних ґраток входять також фокусуючі ввігнуті ґратки з непрямолінійними штрихами і квазіперіодичною структурою, просторова частота якої змінюється по заданому закону. Такі ґратки дозволили, зокрема, створити спектральні прилади з характеристиками, недосяжними при використанні класичних решіток [6]. Зупинимось в даній роботі ґратках - розщеплювачах монохроматичних світлових пучків і світлоділильних ґратках. Розщеплювачі повинні розподіляти падаючий світловий потік між кількома робочими порядками. При цьому певні вимоги пред'являються як до кутів дифракції, так і до співвідношень інтенсивностей в різних порядках. Світлоділильні ґратки призначені для поділу випромінювання різних довжин хвиль по потрібних порядках. Вперше такі ґратки були запропоновані Даманом 1978 році [3]. Зазначені завдання вирішуються за рахунок додаткової фазової модуляції падаючої хвилі в межах просторового періоду дифракційної мікроструктури [12].

Амплітудна зонна пластинка була запропонована О. Френелем на початку XIX сторіччя [9]. Її структура представляла собою прозорі та непрозорі концентричні кільцеві зони, що чергуються, радіуси меж яких пропорційні кореням з цілих чисел. Така пластинка за дією еквівалентна кільком збиральним і розсіювальним лінзам, вкладеним в одну апертуру (рисунки 1.1 та 1.2).

У 1898 році Р. Вуд, реалізуючи ідеї Дж. Релея, вперше виготовив фазоінверсну зонну пластинку, а в 1957 році Г.Г. Слюсарєв запропонував зонну пластинку з фазовим профілем зон [4], який сьогодні вітчизняні та закордонні фахівці називають кіноформною. Термін «кіноформна лінза» був введений в роботах Л. Ліземо, П. Хірша і Дж. Джордана [4]. Дифракційна ефективність η_m (під якою розуміється відношення інтенсивності світла, продифрагованого в m -й порядок I_m до інтенсивності падаючого світла I_0) у першому робочому порядку амплітудної пластинки Френеля не перевищує 10,1%, а фазоінверсної пластинки Релея-Вуда – 40,5%. А робота Г.Г. Слюсарєва

показала принципову можливість створення дифракційних елементів з ефективністю, близькою до 100%. Однак практична можливість виготовлення таких елементів відкрилась лише в останні десятиліття з розвитком мікроелектронних і лазерних технологій . [6]

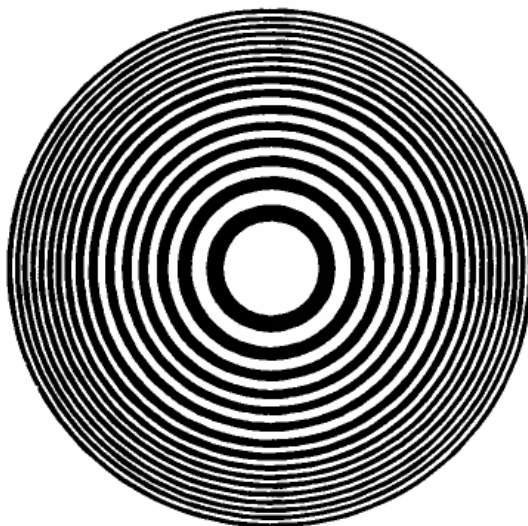


Рисунок 1.1 – Зонна пластинка Френеля



Рисунок 1.2 – Фокуруючі властивості зонної пластинки

ДОЕ зі структурою, подібною до зонної пластинки, називають дифракційними лінзами. У складі оптичної системи вони можуть використовуватися як силові або як корекційні елементи. В останньому випадку їх оптична сила невелика, але завдяки дисперсійним властивостям і асферизації фронту дифрагованої хвилі такі елементи є ефективними коректорами хроматичних і монохроматичних аберацій. [10]

Один з найбільш цікавих класів ДОЕ утворюють фокусатори лазерного випромінювання. Фокусатори - це ДОЕ, які мають регулярну мікроструктуру і фокусують лазерне випромінювання в тонкі лінії або задані області простору. Вони запропоновані і вперше досліджені в 1981 році. [3]

Завдяки працям І.М. Сісакяна, В.А. Сойфера, В.А. Данилова і ряду інших вітчизняних дослідників у 80-х роках минулого століття отримані основні оптично-геометричні рішення задачі фокусування і створені різні фокусатори. Були розвинені теоретичні аспекти методів розрахунку фокусаторів, доведено теореми існування і можливості розв'язання задач синтезу фокусаторів. Особливо актуальне використання фокусаторів для потужних лазерів, що працюють в середньому ІЧ-діапазоні ($\lambda = 10,6$ мкм). Це пов'язано з меншою вартістю і відсутністю екологічно шкідливого впливу виробництва ДОЕ в порівнянні з лінзовими фокуруючими системами лазерів. Особливий інтерес представляє використання фокусаторів на алмазних плівках, що володіють в діапазоні середнього ІЧ-випромінювання високої термостійкості до 5 кВт/см^2 . [3]

Ключовою проблемою у створенні фокусаторів є досягнення високої енергетичної ефективності при формуванні необхідного розподілу інтенсивності в фокальній області. Проте, завдання управління ефективністю в заданих дифракційних порядках одна з найважливіших загальних проблем дифракційної оптики, і наступний розділ присвячується саме цій проблемі.

З науково-технічної точки зору головною проблемою, що постає перед дослідниками слід вважати необхідність суворого контролю за кожним кроком проектування приладу. Ризик відмови системи може залежати від відсутності або недосконалості одного з кроків. До них відносяться, зокрема, оптична конструкція системи, широкий спектр методів виготовлення ДОЕ, тестування елементів та інтеграцію системи в прилад, де кожен крок суттєво відрізняється від процесів, застосованих у суто рефракційних системах.

Успішна оптична конструкція складної системи часто пов'язана з досвідом відповідального інженера. Завдяки абсолютно іншим властивостям дифракційних лінз (ДЛ) порівняно з рефракційними лінзами, наприклад, їх від'ємній дисперсії, властивостям мультифокальності чи залежності від довжини хвилі, змін у оптичній конструкції не уникнути, що іноді призводить до помилок або до повного виходу з ладу системи, що відповідно збільшує час розробки. Крім законів геометричної оптики розробник гібридної системитакож

має мати вагому базу знань з теорії дифракції та повинен бути досвідчений у використанні дифракційних методів проектування. [37]

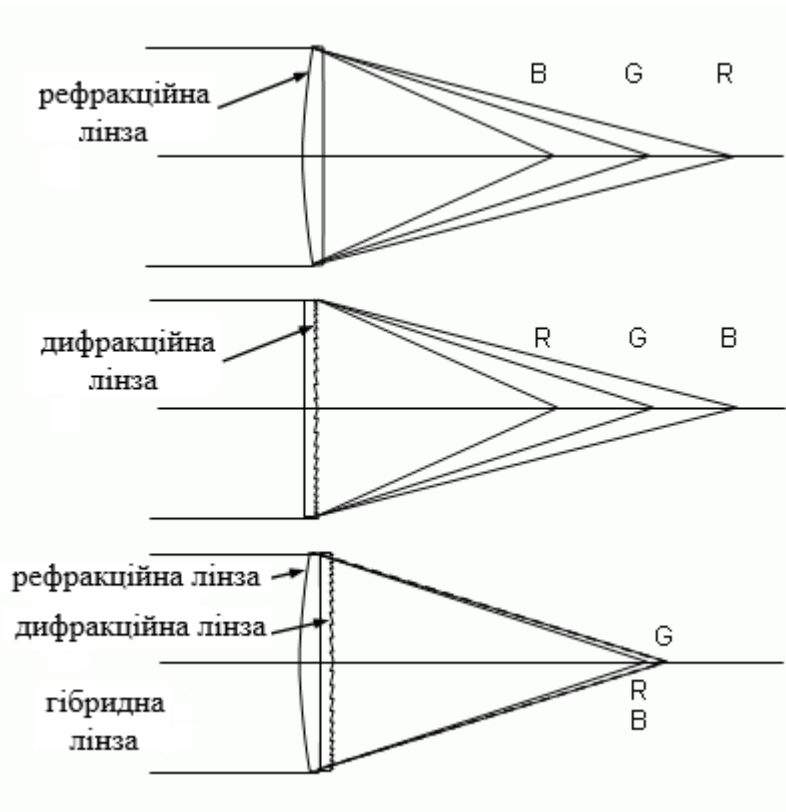


Рисунок 1.3 Відмінності між фокусуванням поліхроматичного світла різними видами лінз (R – червона складова світла, G – зелена складова, B – синя складова)

Технології виготовлення ДЛ в основному поділяються на три категорії: процес освоєння технології, виготовлення інструментів для тиражування, і сам процес тиражування. Для кожної з цих категорій розроблений цілий спектр технологій. Наприклад, для процесу освоєння або для виготовлення обмеженої кількості високоякісних елементів використовуються такі технології, як алмазне точіння, прямий запис лазерним променем, запис електронним променем, літографія, лазерна абляція. Для тиражування можливі наступні технології: лиття під тиском, гаряче тиснення, ультрафіолетове чи точне формування скла. Кожна з цих технологій має певні переваги, але також має свої обмеження, так що вони застосовні лише для конкретних завдань, однак універсальної технології поки немає. Слід зауважити, що впровадження

декількох різних технологій є дорогим та трудомістким, тому це часто економічно не виправдано. З початку створення ДОЕ, та впровадження гібридної – дифракційно-рефракційної концепції та пов'язані з цим технології повинні конкурувати з усталеними системними концепціями з налагодженими і затвердженими технологіями, в яких кожна деталь має оптимізуватись роками та десятиліттями. [37]

Гібридна концепція та пов'язані з цим необхідні виробничі процеси повинні подолати всі ці перешкоди. Однак лише поступове вдосконалення усталених технологій виготовлення набагато простіше та потребує менших витрат часу і коштів, ніж впровадження повністю нових технологій.

Наразі ДЛ широко використовуються у багатьох галузях науки, техніки та медицини, чим довели свою функціональну незамінність, а це означає, що використання ДЛ потенційно дозволяє покращити продуктивність системи, яка не може бути реалізована традиційними підходами. Більше того, вартість одного нового елемента системи, як правило, повинна знаходитися в тому ж ціновому діапазоні, що й елемент, який замінюється. Замовники часто не готові платити за новий товар значно більше, ніж за попередній. При впровадженні нових технологічних підходів, наприклад, використанні дифракційної оптики для формування зображень [3], можливість демонстрації продукту часто обмежується кількома зразками, тож про необхідність у масовому виробництві ДЛ поки мова не йде. Водночас, в офтальмології ДЛ використовують уже багато років як інтраокулярні лінзи для заміни природнього кришталика ока, їх виробництво добре налагоджене і приносить виробникам мільйонні прибутки. Отже, впровадження нових технологій потребує великих грошових затрат, проте має великий потенціал. Необхідні інвестиції в нові технології виготовлення ДЛ, оскільки створення окремо взятих одиничних зразків економічно не вигідно. [37]

1.2 Основні характеристики дифракційних оптичних елементів

ДОЕ з мікроструктурою, просторова частота (а отже, і період) яких змінюється в радіальному, одному або двох взаємно перпендикулярних напрямках за заданим законом, складають клас дифракційних лінз (ДЛ) та асферик. ДЛ мають оптичну силу, що виникає завдяки квадратичним члену в законі зміни просторової частоти, і при цьому якщо закон зміни просторової частоти плоска симетрична крива, то ДЛ по фокусуючій дії подібна до традиційної циліндричної лінзи. Коли структура обертально-симетрична, то ДЛ по фокусуючій дії подібна до традиційної сферичної лінзи. І нарешті, якщо просторова частота змінюється за різними законами в двох взаємно перпендикулярних напрямках, то ДЛ анаморфотна та прирівнюється к двом схрещеними циліндричним лінзам з різними оптичними силами. [21]

Під дифракційною ефективністю (ДЕ) розуміють відношення інтенсивності світла, що відхилилося в певний порядок дифракції, до інтенсивності світла, що впало на ДЛ [4]. Цей параметр є однією з найважливіших характеристик ДЛ.

Наступною характеристикою ДЛ є оптична сила Φ , що виникає внаслідок наявності квадратичного члена в законі зміни просторової частоти. ДЛ з нульовою оптичною силою називають дифракційними асфериками або коректорами. Їх просторова частота має члени більш високі, ніж квадратичні. Тому аналогічно пластині Шмідта вносяться асферичні добавки різних порядків. [9]

Хроматичні властивості ДЛ проявляються у вигляді кольорових ореолів навколо зображення. Вони суттєво відрізняються від рефракційних. У дифракційній структурі приріст оптичних шляхів від границь сусідніх зон і фазова затримка на висоті структури повинні дорівнювати одній довжині хвилі. На відміну від звичайних рефракційних лінз фокусна відстань ДЛ обернено пропорційна довжині хвилі, до того ж вони мають від'ємну дисперсію, а її величина на порядок більша, ніж у рефракційних [Error! Reference source not found.].

Для оцінки якості ДЛ зазвичай використовують [9] - закон зміни просторової частоти зонної структури елемента, та форму і глибину її

мікрорельєфу. Перша характеристика визначає форму хвильового фронту, що формує елемент у робочому порядку дифракції, друга – дифракційну ефективність і розподіл енергії по перерізу світлового пучка, що формується.

До кількісних характеристик якості зображення ДОЕ відносяться функція розсіювання точки (ФРТ) та пов'язані з ними оптична передавальна функція (ОПФ), а також модуляційна передавальна функція (МПФ) дифракційної лінзи [Error! Reference source not found.,Error! Reference source not found.].

1.3 Актуальність методів проектування дифракційних лінз

Маючи унікальні фокусуючі та абераційні властивості ДЛ, а також успіхи в області отримання високоефективних мікроструктур данні елементи в наш час знаходять все більш ширше застосування практично у всіх галузях, де потребується оптика. Візьмемо наприклад прилади і пристрої, які використовують лазерне випромінювання (включаючи інформаційні системи і головки для запису/зчитування оптичних дисків) [17], об'єктиви і окуляри видимого та ІЧ-діапазонів [13,14,], телескопи [27], інтерферометри [6], мікроскопи [28], датчики випромінювання [6].

Що стосується сучасної радіoeлектроніки, то тут вирішують проблему формування хвильових фронтів в оптичних і радіосистемах із використанням антенних і фокусуючих пристроїв дифракційного типу, основним елементом яких є дискретні поверхні [8]. Застосовуючи ДОЕ в радіолокаційних пристроях маємо змогу дистанційно виявляти людей і технічні об'єкти під уламками будівель і споруд, при снігових завалах та інше.

Все далі розвиваються технології наслідуючи тренди до мініатюризації, що дозволяють виготовляти високоякісні дифракційні мікролінзи із поперечним діаметром до кількох міліметрів. Ці досягнення використовуються в медицині, а саме в офтальмології (інтраокулярні лінзи [28], рисунок 1.4), дерматології та ендоскопії [24].



Рисунок 1.4 – Інтраокулярна дифракційна лінза

Можна вважати, що створення інтраокулярної лінзи (ІОЛ) є одним із найважливіших досягнень в області офтальмології. ІОЛ це лінза, що імплантується на місце природнього кришталика. Вона заломлює промені світла і формує на сітківці зображення, виконуючи функції природного кришталика. [37]

На рисунку 1.5 показаний гібридний оптичний компонент, що являє собою двохшарову ДЛ, вклеєну між двома однорідними лінзами [16] , а на рисунку 1.6 представлені фотографії телеоб'єктиву з такими компонентами .

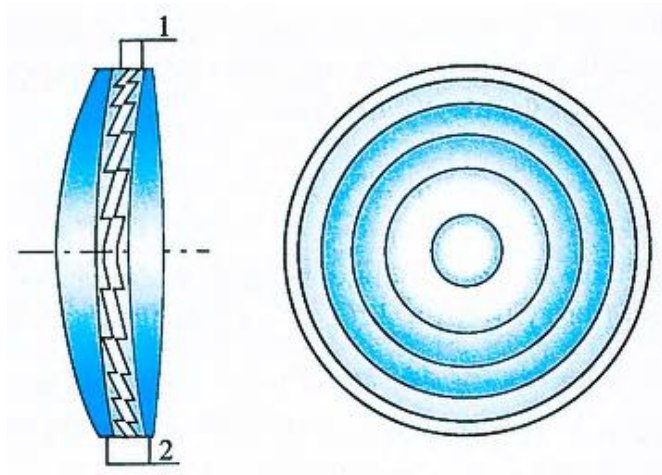


Рисунок 1.5 – Гібридний рефракційно-дифракційний компонент



Рисунок 1.6 – Телеоб'єктив апохромат фірми Canon

Крім традиційних областей використання ДЛ, сьогодні з'являються нові можливості застосування (рисунки 1.7–1.9).



Рисунок 1.7 – Розумні окуляри від Huawei



Рисунок 1.8 – Дисплеї для автомобілів та літаків



Рисунок 1.9 – Мікропроекційна система Head-up

1.4 Сучасний стан ринку ДОО

Розглянемо найпоширеніші та найуспішніші продукти, основною чи складовою частиною яких стали ДД та проведемо характеристику обсягів ринку. [38]

Дифракційні ґратки для спектроскопії є типовими дифракційними елементами і займають найбільшу нішу на ринку дифракційних елементів. Вони є ключовими компонентами спектрометрів, що використовуються в лабораторіях різноманітних галузей – агропродовольча промисловість, біомедична інженерія, або як пристрої для поточного контролю технологічних процесів виробництва. На ринку цих елементів найбільшими компаніями вважаються Jobin Yvon, Carl Zeiss, Newport Corporation, Lightsmyth, Headwall, Spectrogon та or Shimadzu. За підрахунками експертів та менеджерів із продуктів, що діють у цій галузі, загальний обсяг продажів дифракційних ґраток становить приблизно €50 млн. Це сума без урахування ґраток високої якості для космічних або астрономічних досліджень. Для спектроскопічних сенсорних систем на наступні роки очікується стабільний ринок з річним темпом зростання між 6% і 9% [2]. Для мініатюризованих та портативних пристроїв очікується значно більший темп зростання до 20%.

Однією із найбільших проблем із грошовими банкнотами є їх фальсифікація. Для покращення ситуації в цій області доводиться постійно вдосконалювати елементи захисту банкнот від підробки, які, по-перше, повинні проходити просту візуальну перевірку, по-друге, повинні гарантувати високі степені складності для копіювання та підробки. *Дифракційні та інші мікрооптичні структури* мають у цьому відношенні велику зручність використання та великий потенціал для подальшого поліпшення з метою виявлення достовірності. Сьогодні використовують, наприклад, голограми, приховані ефекти зображення, що змінюють колір чи зникають при зміні кута огляду. Крім того, в сучасні банкноти імпантовані особливості на основі заломлення мікролінз, які імітують рухомі ефекти та інші [2].

На ринку друку банкнот можна виділити деякі значні майбутні тенденції. Наприклад, термін експлуатації банкнот стає важливим фактором, що

призводить до переходу від класичного паперу до полімерів. При цьому передбачається, що полімерні банкноти прослужать у 3,5 рази довше, ніж паперові. У поєднанні з полімерними підкладками буде доступна більша площа для функцій мікрооптичного захисту, що ефективно реалізується на базі ДОЕ.

На ринку *високоєфективних оптичних інструментів* використання окремих елементів, таких як дифракційна лінза чи мікролінза, все ще є досить затратним, в порівнянні із загальною вартістю всього приладу. Крім того, через обмежену кількість щорічного продажу систем, обсяг продукції досить помірний. Наприклад, для систем високоточних камер із вбудованим зображувачем ДОЕ продаж складає кілька приладів на рік із типовою торговою ціною в кілька тисяч євро. Ціна окремої складової, дифракційної лінзи, знаходиться у діапазоні від кількох десятків до кількох сотень євро. Розв'язання проблеми здешевлення ДЛ вимагає вдосконалення технології для зниження вартості виробництва загалом [3-5].

Можна вважати, що створення *інтраокулярної лінзи* (ІОЛ) є одним із найважливіших досягнень в області офтальмології. ІОЛ це лінза, що імплантується на місце природнього кришталика. Вона заломлює промені світла і формує на сітківці зображення, виконуючи функції природного кришталика. Спочатку такі ІОЛ були не здатні виконувати функцію акомодатії, людина не могла однаково добре бачити ближні і дальні об'єкти. Для вирішення цієї проблеми були запропоновані біфокальні ДОЕ – що стало революційним проривом у цій області. Ефект біфокальності досягається за рахунок дифракції світлового потоку на безперервному дифракційному мікрорельєфі [6,7].

Як показують дослідження ринку ІОЛ провідних учених світу, щороку невпинно зростає кількість операцій по заміні кришталика при катаракті. На жаль, за прогнозами тенденція росту кількості операцій зберігатиметься надалі. Оцінка німецьких учених показує зростання ринку ІОЛ. У 2018 році розмір світового ринку становив €680 млн. За оцінками американських учених у 2020 році ринок становитиме \$4,7 млрд. Водночас у дослідників залишаються невирішені проблеми – покращення акомодативної здатності та зменшення

хроматичної аберації. У зв'язку з цим подальшого розвитку потребують теоретичні і експериментальні дослідження методів проектування ДЛ, що разом із зростаючим попитом робить цю задачу дуже актуальною та економічно обґрунтованою.

Вибір методу обчислення ДЛ, зазвичай, безпосередньо пов'язаний з технологіями виготовлення та того, де цей елемент планують використовувати. Треба зробити акцент на тому, що можливості сучасної мікролітографії дають можливість створювати профілі ДЛ різної складності. Проте перед теперішніми науковцями стоять задачі, вирішення яких не завжди можливо існуючими на сьогоднішній день методами обчислення ДЛ. У зв'язку з цим подальшого розвитку потребують теоретичні і експериментальні дослідження методів проектування ДЛ [38].

Як бачимо із вище перерахованого, проблема проектування ДЛО є актуальною. Тому в рамках цієї роботи зупинимося на методах проектування дифракційних лінз, які мають сьогодні широке застосування.

Висновки до розділу 1

Дифракційні лінзи у різних відгалуженнях техніки та науки знаходять усе ширше застосування. Вони здатні стати аналогами переважної більшості типових оптичних елементів, таких як лінзи і дзеркала. Перевагами ДЛ є їх компактність в порівнянні з іншими оптичними елементами, мала вага, а головною - плоска форма. У комбінації із економічними літографічними методами виготовлення ДЛ пропонують уже сьогодні для багатьох галузей застосування привабливі економічно вигідні альтернативи.

Виходячи із вище сказаного, ми маємо беззаперечну необхідність і актуальність у вивченні та дослідженні нових методів проектування ДЛ, які б могли задовольнити висунуті до них вимоги.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЛІНЗ

2.1 Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні геометричної оптики

Будемо вважати тонким ДОЕ, якщо висота його мікрорельєфу пропорційна розподілу ейконалу $\psi(x, y)$ світлового поля в площині безпосередньо за елементом. Наближення тонкого оптичного елементу дозволяє розрахунок ДОЕ до розрахунку ейконалу $\psi(x, y)$ світлового поля в площині $z = 0$ із умови фокусування хвильового поля з комплексною амплітудою. [7]

$$V(x, y) = V_0(x, y) \exp[jk\psi(x, y)] = V_0(x, y) \exp[j\varphi(x, y)] \quad (2.1)$$

в задану лінію (точку), де $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; $\varphi(x, y)$ – фазова функція.

Розрахунок поля (2.1) в наближенні геометричної оптики ґрунтується на розв’язку рівняння ейконалу і переносу [35]. Якщо ДОЕ знаходиться в повітрі, то рівняння матиме вигляд

$$\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)^2 = 1. \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) є нелінійним диференціальним рівнянням в часткових похідних першого порядку. Рівняння (2.2) повинно бути доповнено граничними умовами, які визначають функцію ейконалу $\psi(x, y, z)$ на деякій заданій поверхні.

2.2 Проектування асферичних лінз Френеля із сферичним профілем

В цьому підрозділі розглядається метод проектування лінзи Френеля, сферичні поверхні якої відповідають корпусу приладу і не узгоджені з фокусною відстанню лінзи. Це означає, що лінза Френеля створюються на сферичній поверхні з заданими радіусами кривизни.

В основі методу лежить перетворення паралельного пучка променів у промені, які збігаються в заданому фокусі. Процес проектування полягає у

використанні закону Снеліуса для визначення профілю канавок на одній із сферичних поверхонь лінзи. В результаті отримаємо лінзу Френеля з канавками постійної ширини та змінної глибини. Канавки будуть плоскими і неглибокими біля центру лінзи та глибокими і круто нахиленими на периферії. Метод постійної ширини канавок дозволяє точно визначити положення вершини кожної канавки і спрощує математичні обчислення. [21]

Проектування відбувається в наступному порядку. Розробник приладу задає фокусну відстань лінзи, радіуси сферичних поверхонь і показник заломлення матеріалу (корпусу приладу). Спочатку обирається із технологічних міркувань ширина канавок достатньо великого розміру для зменшення впливу дифракційних ефектів. Поверхню лінзи розбиваємо на концентричні канавки з плоскою основою, до яких застосовуємо закон Снеліуса. Кожна канавка має різні фокусні відстані у поперечному перерізі. Вилучаємо найбільші розбіжності у фокусних відстанях методом наближення дна плоскої канавки до асферичної лінзи:

$$z(x') = \frac{cx'^2}{1 + \sqrt{1 - c^2(k+1)x'^2}} + a_1x'^4 + a_2x'^6 + a_3x'^8, \quad (2.3)$$

де c, k, a_m – сферичний, конічний і асферичні коефіцієнти; x' – відстань (радіус) від центра лінзи; z – глибина канавки.

Метод проектування враховує загальну товщину матеріалу лінзи (корпусу) і розташовує вершину кожної канавки на сферичній поверхні. Проектування таких лінз Френеля більш складне, ніж проектування лінз з плоскими поверхнями. У сферичних лінз зовнішня поверхня заломлює падаючий промінь. Ми повинні узгодити поверхню канавки із зовнішньою поверхнею так, щоб вони в сукупності давали задану фокусну відстань. За цих умов необхідно розрахувати кут нахилу поверхні кожної канавки, якщо відоме положення вершини кожної канавки. [21]

Для цього використаємо рисунок 2.1, із якого запишемо систему рівнянь:

$$\sin \varepsilon = \frac{x}{R}; \quad (2.4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x'}{f - R + \sqrt{(R - t)^2 - x'^2}}; \quad (2.5)$$

$$\sin \varepsilon = n \sin \varepsilon'; \quad (2.6)$$

$$\sin(\alpha + \delta) = n \sin(\varepsilon - \varepsilon' + \delta), \quad (2.7)$$

де R – радіус першої поверхні лінзи; f – фокусна відстань; t – товщина матеріалу корпусу (лінзи).

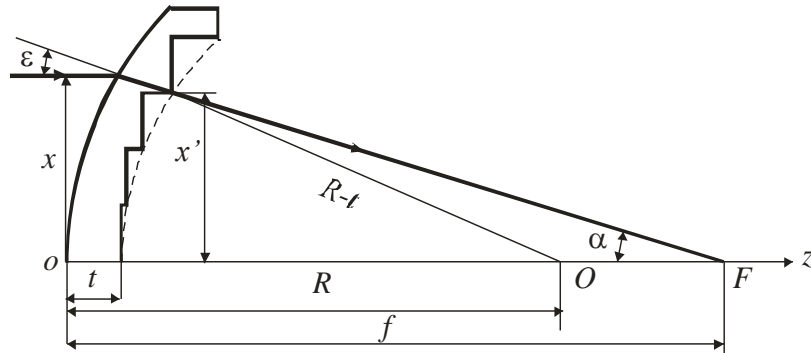


Рисунок 2.1 - Хід променя у сферичній лінзі Френеля

Рисунок 2.1 більш детально аналізує проходження променя через лінзу Френеля з урахування кута нахилу дна канавки δ . При цьому верхня (бокова) поверхня канавки залишається горизонтальною. Промінь падає на першу сферичну поверхню в точці x і виходить із лінзи в точці x' . Використовуючи закон Снеліуса (2.7), можна встановити залежність між координатами точки падіння x і точки виходу променя із лінзи x' та кутом нахилу канавки δ : [21]

$$\operatorname{tg} \delta(x, x') = \frac{\sin \varepsilon(x) - n \sin[\varepsilon(x) - \varepsilon'(x')]}{n \cos[\varepsilon(x) - \varepsilon'(x')] - \cos \varepsilon(x)}. \quad (2.8)$$

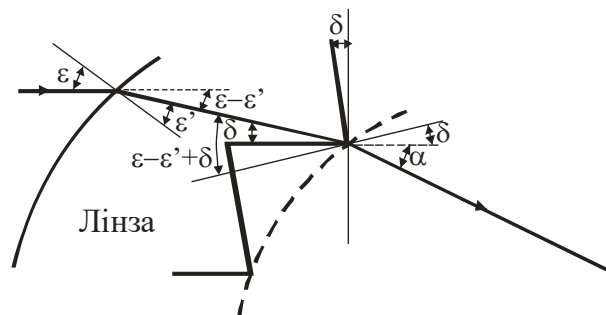


Рисунок 2.2 – Хід променів через лінзу Френеля
з урахування нахилу дна канавки

Щоб використати рівняння (2.8), нам необхідно знайти точку падіння променя x та вершини канавки x' . На рисунку 2.3 зображено хід променя через задану вершину канавки. Кут заломлення ε' близький до нуля, а зміщення променя $x - x'$ в лінзі мале порівняно з товщиною лінзи t . Тоді $t' \approx t$. Значення x можна знайти із системи рівнянь. [21]

$$\frac{t}{c} \approx \cos \varepsilon' \text{ і } \frac{x-x'}{c} = \sin (\varepsilon - \varepsilon'), \quad (2.9)$$

розв'язком якого є функція

$$x = x' + \frac{t \sin [\varepsilon(x) - \varepsilon'(x')]}{\cos \varepsilon'(x')}. \quad (2.10)$$

Розрахувавши значення x за формулою (2.10), можна знайти кут нахилу канавки δ за формулою (2.8). [21]

Для підвищення точності розрахунків можна використати початкові координати не вершини канавки, а центр дна канавок. В той же час лінза має канавки різної глибини, що визиває певні труднощі знаходження цього центру.

Аберації лінзи Френеля можна зменшити, якщо плоске дно канавок з певним нахилом замінити асферичною поверхнею (2.3). Нахил такої поверхні в будь-якій точці визначається похідною функції (2.3), тобто

$$\begin{aligned} \frac{dz(x')}{dx'} = & \frac{2cx'}{1+\sqrt{1-c^2(k+1)x'^2}} + \frac{c^3x'^3}{\left[1+\sqrt{1-c^2(k+1)x'^2}\right]^{1/2}\sqrt{1-c^2(k+1)x'^2}} + \\ & + 4a_1x'^3 + 6a_2x'^5 + 8a_3x'^7. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Використовуючи метод Левенберга – Марквардта, можна узгодити рівняння (2.11) з кутом нахилу канавки δ і координатою її вершини x' . [17]

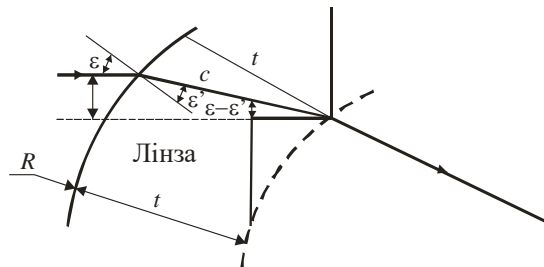


Рисунок 2.3 – До визначення співвідношення між вершиною канавки x' і точкою x падіння променя на сферичну поверхню

Таким чином, друга поверхня лінзи складається із асферичних канавок, вершини яких розміщені на сферичній поверхні. Геометричні параметри цієї поверхні описуються рівняннями

$$z_{st,q}(x') = \frac{c(qW_{st})^2}{1+\sqrt{1-c^2(k+1)(qW_{st})^2}} + a_1(qW_{st})^4 + a_2(qW_{st})^6 + a_3(qW_{st})^8; \quad (2.12)$$

$$z_r(x') = \sqrt{(R-t)^2 - (qW_{st})^2}; \quad (2.13)$$

$$Z(x') = z(x') - z_{st,q}(x') + z_r(x'), \quad (2.14)$$

де q – номер канавки, рівний цілій частині x'/q ; W_{st} – ширина канавки; t – товщина матеріалу лінзи між зовнішньою поверхнею лінзи і вершиною канавки; x' – відстань від центра лінзи; $Z(x')$ – відстань від площини xu (від осі x) до другої поверхні, на якій розташована лінза Френеля. [17]

Рівняння (2.12) розділяє асферичну поверхню на окремі канавки уздовж прямої лінії, паралельній осі x . Рівняння (2.13) визначає радіус внутрішньої (другої) поверхні лінзи і розташовує канавки уздовж цього радіуса. Рівняння (2.14) об'єднує рівняння (2.3), (2.12) та (2.13) і визначає поверхню лінзи Френеля. [17] Це рівняння можна використати для керуванням процесом виготовлення еталонної лінзи Френеля методом алмазного точіння.

Для покращення технології виготовлення лінзи Френеля жолобок (поверхня) кожної канавки має кут нахилу $\delta = 1^\circ$ і радіус заглиблення канавки 2 мкм. Це покращує процес механічної обробки поверхні та процес лиття під тиском. [14]

2.3 Розрахунок дифракційних оптичних елементів в наближенні теорії дифракції

При проектуванні дифракційних оптичних елементів виникає потреба у розв'язанні прямої і оберненої задач теорії дифракції світла. [5]

Пряма задача дифракції світла формулюється наступним чином: необхідно знайти функцію $V(x, y, z)$, яка задовольняє в середині об'єму v , що обмежується поверхнею S , і на поверхні S рівнянню $L\{V(x, y, z)\} = 0$ в

часткових похідних, де $L\{ \}$ – оператор, який визначається диференціальним рівнянням Гельмгольца. [5]

Обернена задача дифракції світла стосовно методів визначення фазової функції $\varphi_{doe}(x, y)$ ДОЕ формулюється наступним чином: необхідно знайти профіль зон мікрорельєфа поверхні елемента $h_{doe}(x, y)$, який задовольняє умові отримання заданого розподілу інтенсивності $I_0(x_0, y_0, z)$ в певній зоні спостереження (рисунок 2.4). [5]

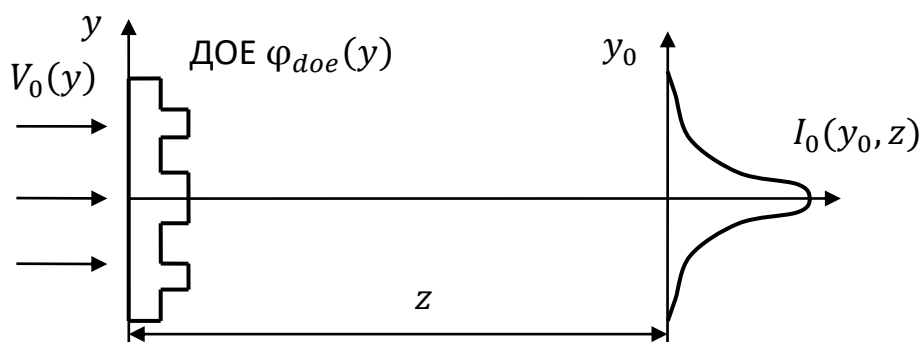


Рисунок 2.4 – Одновимірна схема формування ДОЕ заданого розподілу інтенсивності $I_0(y_0)$

2.4 Проектування дифракційних лінз із заданими коефіцієнтами пропускання

Для вирішення багатьох задач науки і техніки необхідно сфокусувати випромінювання в складну область простору, тобто сформувати заданий розподіл інтенсивності вздовж певної кривої чи в заданій області простору.

Дифракційна лінза є одним із найважливіших оптичних елементів, які широко використовуються в оптиці та в інших галузях науки. ДЛ є фокусатором, основною проблемою у створенні якого є досягнення високої енергетичної ефективності при формуванні необхідного розподілу інтенсивності у фокальній площині. Проблемам проектування ДЛ присвячено ряд робіт. Але в них не знайшли відображення методики визначення

конструктивних параметрів ДЛ, які забезпечують заданий розподіл поля в площині спостереження. [3]

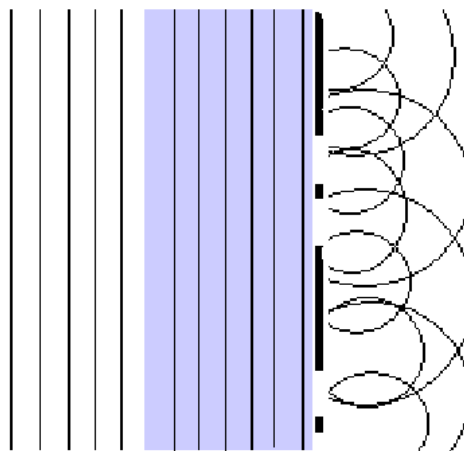


Рисунок 2.5 – Амплітудна дифракційна лінза

Як уже зазначалося у розділі 1, дифракційні лінзи – це оптичні пристрої, які забезпечують періодичну просторову модуляцію падаючої хвилі по амплітуді або по фазі, або по амплітуді і фазі одночасно. Відповідно до цього визначення розрізняють амплітудні (рисунок 2.5), фазові (рисунок 2.6) та амплітудно-фазові дифракційні лінзи. Їх головними характеристиками є: ефективність – процент енергії, що потрапив в задану область, і помилка – відмінність отриманого розподілу інтенсивності від заданого. Якщо властивості структури періодично змінюються в одному напрямку, то решітка називається одномірною, якщо в кількох напрямках - просторовою. [22]

Амплітудні дифракційні лінзи на практиці використовуються дуже рідко, хоча їх виготовлення є простим, але їх енергетична ефективність низька. Фазові значно виграють по ефективності. Їх теоретична ефективність - близько 97% для одномірних і 94% - для двомірних. У амплітудних ефективність складає всього близько 50% або й менше. [30]

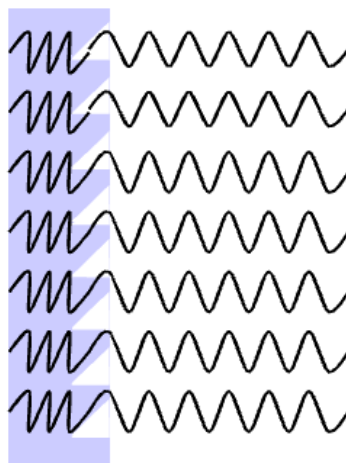


Рисунок 2.6 – Фазова дифракційна лінза

Спроекуємо дифракційну лінзу з амплітудним коефіцієнтом пропускання.

2.4.1 Дифракційна лінза з амплітудним коефіцієнтом пропускання

В загальному випадку під комплексним амплітудним коефіцієнтом пропускання $t(x, y)$ розуміють відношення амплітуди світлового поля безпосередньо за екраном до амплітуди поля падаючої хвилі у відповідних точках. [33]

Звернемося до теорії дифракції Френеля. Нехай на плоский безкінечний непрозорий екран з отвором Σ кінцевого розміру падає монохроматична хвиля з довжиною λ . З плоским екраном зв'яжемо прямокутну систему координат xu , а з площиною спостереження – x_0u_0 (рисунок 2.7). Причому площина спостереження паралельна площині екрану і знаходиться на відстані z від нього. [7]

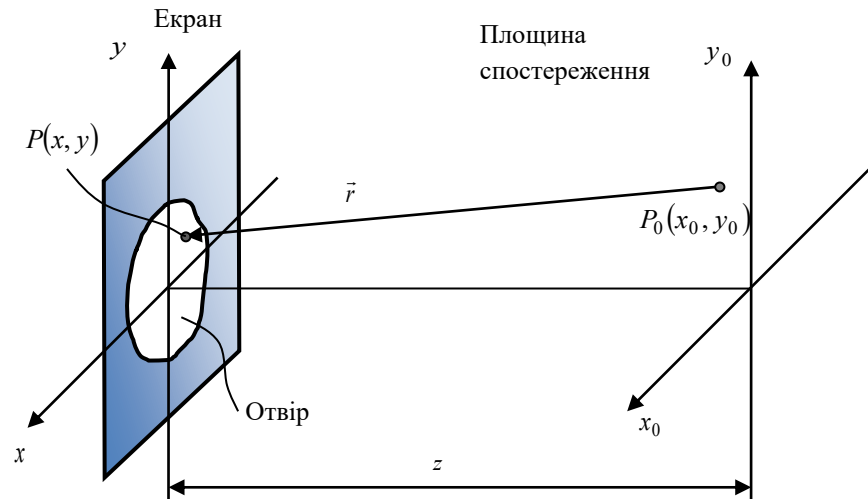


Рисунок 2.7 – Схема дифракції Френеля

Згідно теорії дифракції Френеля [7] амплітуда поля $V(P_0)$ в точці спостереження $P_0(x_0, y_0)$ визначається за формулою:

$$V(x_0, y_0) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \times \iint_{-\infty}^{\infty} V(x, y) \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda z} [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2]\right\} dx dy, \quad (2.15)$$

де $V(x, y)$ – амплітуда поля безпосередньо за екраном. Множник $\exp(jkz)$ визначає постійний фазовий зсув, який не впливає на розподіл поля $V(x_0, y_0)$, який надалі не враховуємо.

Нехай на екран з амплітудним коефіцієнтом пропускання $t_0(x, y)$ нормально падає плоска монохроматична хвиля одиничної амплітуди. Тоді розподіл поля безпосередньо за екраном описується функцією $V(x, y) = t_0(x, y)$. За цих умов розподіл поля в площині спостереження $x_0 y_0$ можна представити у вигляді:

$$V(x_0, y_0) = \frac{1}{\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} t_0(x, y) \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx dy. \quad (2.16)$$

Амплітуду поля в центрі дифракційної картини визначають за умови, що $x_0 = y_0 = 0$. Тому інтенсивність в центрі дифракційної картини

$$I(0,0) = |V(0,0)|^2. \quad (2.17)$$

Визначення фокусної відстані дифракційної лінзи. Екран працює як лінза в тому випадку, коли функція (2.17) набуває максимального значення, тобто $z = f$.

Розподіл інтенсивності в фокальній площині лінзи. Для знаходження розподілу інтенсивності в фокусі ДЛ необхідно підставити (2.16) в формулу (2.17) та обрахувати максимальне значення інтегралу при $z = f$.

Розглянемо ДЛ, яка має амплітудний коефіцієнт пропускання (рисунок 2.9)

$$t_o(r) = \frac{1}{2} [1 + \text{sng}(\cos(\alpha r^2))] \text{circ}\left(\frac{r}{l}\right), \quad (2.18)$$

де

$$\text{sng}(z) = \begin{cases} 1, & \text{коли } z > 0, \\ 0, & \text{коли } z = 0, \\ -1, & \text{коли } z < 0 \end{cases}$$

– функція знаку;

$$\text{circ}\left(\frac{r}{l}\right) = \begin{cases} 1, & \text{коли } 0 \leq r \leq l, \\ 0, & \text{коли } r > l \end{cases}$$

– кругова функція (l – радіус дифракційної лінзи).

Екран, що розглядається, називається зонною пластинкою Френеля.

Знайдемо область існування функції знаку:

$$\begin{aligned} & \text{sng}(\cos \alpha r^2) = \\ & = \begin{cases} 1, & \text{коли } \cos(\alpha r^2) > 0; \alpha r^2 \in \left(\frac{3\pi}{2} + 2\pi n; \frac{5\pi}{2} + 2\pi n\right) \text{ та } 0 < \alpha r^2 < \frac{\pi}{2}, \\ 0, & \text{коли } \cos(\alpha r^2) = 0; \alpha r^2 = \frac{\pi}{2} + \pi n, \\ -1, & \text{коли } \cos(\alpha r^2) < 0; \alpha r^2 \in \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi n; \frac{3\pi}{2} + 2\pi n\right). \end{cases} \end{aligned}$$

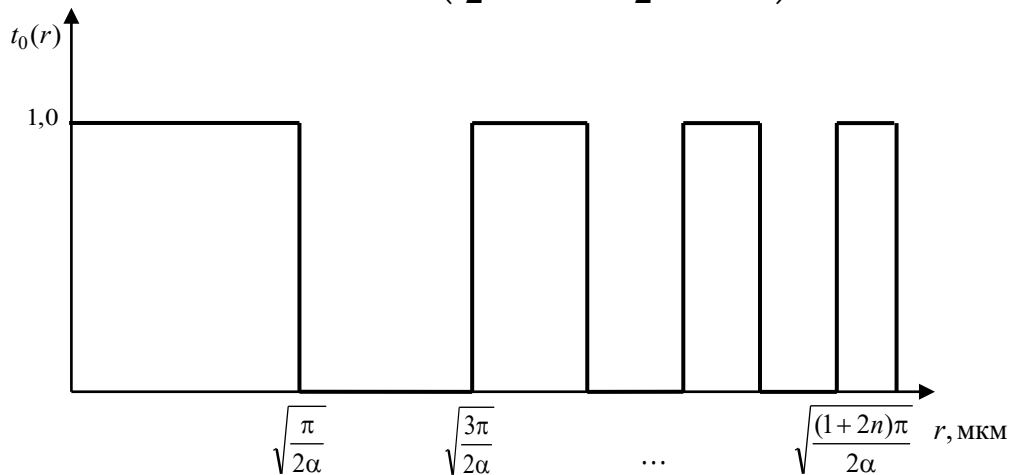


Рисунок 2.8 – Амплітудний коефіцієнт пропускання зонної пластинки Френеля

Або у іншому вигляді:

$$\text{sng}(\cos \alpha r^2) = \begin{cases} 1, \text{ коли } r \in \left(0; \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}\right) \cup \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(3+4n); \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(5+4n)\right), \\ 0, \text{ коли } r = \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(1+2n), \\ -1, \text{ коли } r \in \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(1+4n); \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(3+4n)\right). \end{cases}$$

У зв'язку з цим амплітудний коефіцієнт пропускання зонної пластинки Френеля має вигляд:

$$t_o(r) = \begin{cases} 1, \text{ коли } r \in \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(3+4n); \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(5+4n)\right) \text{ та } 0 < r < \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}, r \leq l; \\ 0, \text{ коли } r \in \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(1+4n); \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}(3+4n)\right), r \leq l; \end{cases} \quad (2.19)$$

Визначимо амплітуду поля в центрі дифракційної картини, від n -ї зони Френеля. Для цього підставимо (2.19) до інтегралу (2.16): [7]

$$V_n(0,0) = \frac{1}{j\lambda z} \int_{S_n} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda z} [x^2 + y^2]\right\} dx dy, \quad (2.20)$$

де S_n – площа n -го кільця зони Френеля.

Перейдемо в інтегралі (2.20) до полярної системи координат:

$$\begin{aligned} \rho^2 &= x^2 + y^2, \\ dx dy &= \rho d\rho d\varphi, \\ r_{n1} &< \rho < r_{n2}, \\ 0 &< \varphi < 2\pi, \end{aligned}$$

де r_{n1}, r_{n2} – радіуси n -ї зони Френеля.

Тоді інтеграл (2.20) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} V_n(r, \varphi) &= V_n(r) = V_n(0) = \\ &= \frac{1}{j\lambda z} \int_{r_{n1}}^{r_{n2}} \int_0^{2\pi} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda z} \rho^2\right\} \rho d\rho d\varphi = \end{aligned}$$

$$= \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} r_{1n}^2 \right\} - \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} r_{2n}^2 \right\}$$

Розглянемо окремо два випадки:

$$1. \ r \in \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}(3+4n)}; \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}(5+4n)} \right). \text{ Тоді}$$

$$\begin{aligned} V_n(0) &= \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} \frac{\pi}{2\alpha} (3+4n) \right\} - \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} \frac{\pi}{2\alpha} (5+4n) \right\} = \\ &= \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{2\lambda Z \alpha} (3+4n) \right\} \left(1 - \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{\lambda Z \alpha} \right\} \right) = B \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{2\lambda Z \alpha} (3+4n) \right\}, \end{aligned}$$

$$\text{де } B = 1 - \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{\lambda Z \alpha} \right\}$$

$$2. \ 0 < r < \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}}$$

$$\begin{aligned} V_1(0) &= \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} r_{1n}^2 \right\} - \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} r_{2n}^2 \right\} = \\ &= \exp\{0\} - \exp \left\{ j \frac{\pi}{\lambda Z} \frac{\pi}{2\alpha} \right\} = 1 - \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{2\lambda Z \alpha} \right\} = A. \end{aligned}$$

Визначимо кількість прозорих смуг N , при умові, що кругла зіниця співпадає з правим радіусом останнього прозорого кільця. У цьому випадку:

$$\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha}(5+4N)} = l,$$

$$\frac{\pi}{2\alpha}(5+4N) = l^2,$$

$$N = \frac{\alpha}{2\pi} l^2 - \frac{5}{4}, N \in \mathbb{Z}.$$

Знайдемо результуючу амплітуду поля, утворену в результаті інтерференції хвиль від N зон:

$$\begin{aligned} V(0) &= V_1(0) + \sum_{n=0}^N V_n(0) = A + B \sum_{n=0}^N V_n(0) = \\ &= A + B \sum_{n=0}^N \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{2\lambda Z \alpha} (3+4n) \right\} = \end{aligned}$$

$$= A + B \exp \left\{ j \frac{3\pi^2}{2\lambda z \alpha} \right\} \left[1 + \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} \cdot 2 \right) + \dots + \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} 2N \right) \right].$$

Ряд $\left[1 + \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} \cdot 2 \right) + \dots + \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} 2N \right) \right]$ являє собою геометричну прогресію. [26]

Скористаємось формулою геометричної прогресії:

$$\Sigma_n = \frac{a_1(1 - q^n)}{1 - q},$$

$$a_1 = 1,$$

$$q = \exp \left\{ j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} 2 \right\}.$$

Сума прогресії дорівнює:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^N \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} 2N \right) &= \frac{1 - \exp \left(j \frac{2\pi^2}{\lambda z \alpha} (N + 1) \right)}{1 - \exp \left(j \frac{2\pi^2}{\lambda z \alpha} \right)} = \\ &= \frac{\exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} N \right) \sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} (N + 1) \right)}{\sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} \right)}. \end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned} V(0) &= 1 - \exp \left(j \frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha} \right) + \left[1 - \exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} \right) \right] \exp \left(j \frac{3\pi^2}{2\lambda z \alpha} \right) \times \\ &\quad \times \frac{\exp \left(j \frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} N \right) \sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} (N + 1) \right)}{\sin \left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} \right)} = \end{aligned}$$

$$= -2j \exp\left(j \frac{\pi^2}{4\lambda z \alpha}\right) \left[\sin\left(\frac{\pi^2}{4\lambda z \alpha}\right) + \frac{\sin\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}(N+1)\right)}{2 \cos\left(\frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha}\right)} \exp\left(j \frac{\pi^2(4N+7)}{4\lambda z \alpha}\right) \right].$$

Знайдемо інтенсивність світла вздовж оптичної осі:

$$\begin{aligned} I(0, z) &= |V(0, z)|^2 = \\ &= 4 \sin^2\left(\frac{\pi^2}{4\lambda z \alpha}\right) + \frac{\sin^2\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}(N+1)\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha}\right)} + \\ &+ 4 \sin\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}(N+1)\right) \cos \frac{\pi^2(4N+7)}{4\lambda z \alpha} \frac{\sin\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}\right)}{\cos\left(\frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha}\right)}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Максимальне значення функції (2.21) визначається другим доданком, тобто:

$$I(0, z) = |V(0)|^2 = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}(N+1)\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha}\right)}. \quad (2.22)$$

Із співвідношення (2.22) маємо, що ДЛ (2.18) має багато фокусів, які визначають з умови, що функція (2.22) набуває свого максимального значення, коли знаменник прямує до нуля, тобто $\cos^2\left(\frac{\pi^2}{2\lambda z \alpha}\right) \rightarrow 0$.

Використавши тригонометричну формулу $\cos^2 x = \frac{1+\cos 2x}{2}$ отримаємо:

$$\frac{1 + \cos\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}\right)}{2} = 0,$$

$$\cos\left(\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha}\right) = -1,$$

$$\frac{\pi^2}{\lambda z \alpha} = \pi + 2\pi m,$$

$$f_m = z = \frac{\pi}{\lambda \alpha (1 + 2m)}. \quad (2.23)$$

Дослідження розподілу інтенсивності, сформованого зонною пластинкою Френеля

Визначимо інтенсивність світла в m – му фокусі. Для цього підставимо (2.23) в (2.21):

$$\begin{aligned} I(0, f_m) = & 4 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4(1 + 2m)} \right) + \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi}{1+2m} (N + 1) \right)}{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2(1+2m)} \right)} + \\ & + 4 \sin \left(\frac{\pi}{1 + 2m} (N + 1) \right) \cos \left(\frac{\pi}{4(1 + 2m)} (4N + 7) \right) \times \\ & \times \frac{\sin \left(\frac{\pi}{1+2m} \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2(1+2m)} \right)}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Аналіз функції (2.24) показує, що зі збільшенням номера фокуса m інтенсивність у фокусі f_m зменшується (таблиця 2.1). Найбільша інтенсивність буде спостерігатися для головного фокусу, коли $m = 0$.

Таблиця 2.1

Залежність інтенсивності від номера фокуса m

m	0	1	2	3	4	5
$I(m)$	146	0.268	1.14	-0.519	-0.047	0.627

Розглянемо залежність інтенсивності світла від кількості прозорих смуг N в зонній пластинці Френеля для головного фокусу f_0 , коли $m = 0$. Побудуємо графіки функції $I(N, f_m)$ (2.21) для кількості смуг $N = \{3; 4; 5\}$ (рисунок 2.9). Задамо початкові умови: $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ мм, $\alpha = 10$ мм⁻¹.

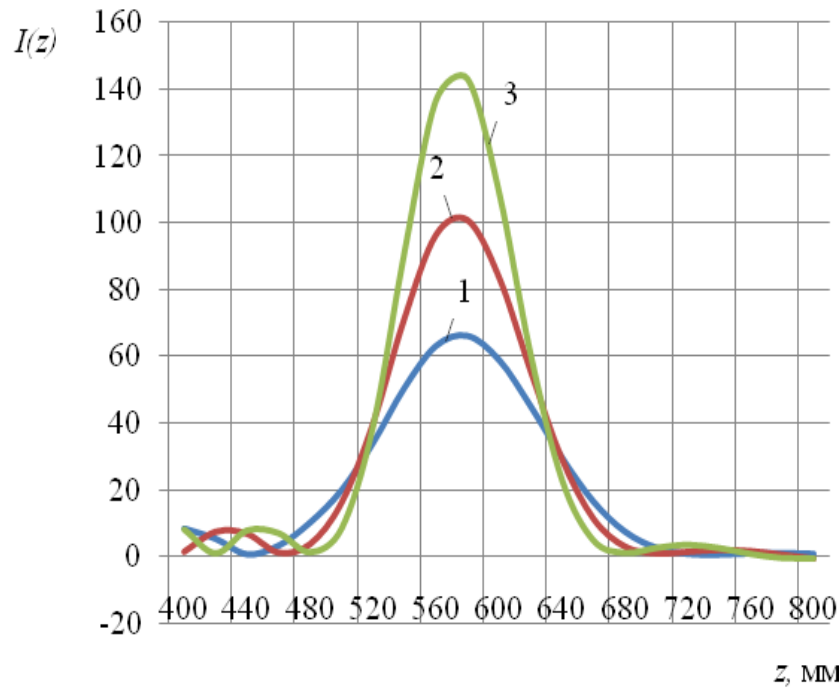


Рисунок 2.9 – Розподіл інтенсивності в головному фокусі пластинки Френеля в залежності від кількості зон N для головного фокуса $f_0 = 570$ мм, коли 1 – $N = 3$, 2 – $N = 4$, 3 – $N = 5$

Як видно з рисунку 2.9, чим більша кількість смуг N , тим більше енергія концентрується в фокусі і не розмивається вздовж осі. З отриманих даних можна зробити висновки, що для зонної пластинки Френеля положення фокусів залежить від довжини хвилі λ , ширини смуг, що задається параметром α та номеру фокуса m , а інтенсивність залежить від кількості смуг N та номера фокуса m . [19]

Отже, положення фокусів залежить від гармонік, з яких складається коефіцієнт пропускання міри $t_o(r) = \frac{1}{2}[1 + \text{sng}(\cos(\alpha r^2))]\text{circ}\left(\frac{r}{l}\right)$ і основна енергія сконцентрована в головному фокусі $m = 0$, що відповідає першій гармоніці.

Формула (2.23) дозволяє визначити параметр зонної пластинки α , який забезпечує задану фокусну відстань:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda f_0}.$$

Звідки маємо, що цей параметр буде змінюватись залежно від довжини хвилі, тобто зонна пластинка Френеля має значні хроматичні аберації. [20]

2.5 Метод ахроматизації ДЛ шляхом проектування її як багатопорядкової

Відмінність багатопорядкової ДЛ (БПДЛ) від звичайної ДЛ полягає у тому, що для БПДЛ світло із розрахунковою довжиною хвилі λ_0 отримує фазову затримку $2\pi p$, де p – ціле число більше одиниці [19]. У випадку звичайної ДЛ $p=1$. Оптичні характеристики БПДЛ для розрахункової довжини хвилі залишаються такими ж, як і для звичайної ДЛ, проте значно змінюються для інших довжин хвиль. Також варто зазначити, що на відміну від традиційних ДЛ, багатопорядкові здатні створювати ахроматичні зображення з високою дифракційною ефективністю.

2.5.1. Оптичні характеристики БПДЛ

Багатопорядкова ДЛ як і у випадку звичайної ДЛ складається із концентричних зон Френеля. Оптична довжина шляху (OPD) від m -ої дифракційної зони БПДЛ до точки фокусування має наступний вигляд $f_0 + mp\lambda_0$, а $f_0 + m\lambda_0$ – для звичайної ДЛ.

Легко зрозуміти, що аналогічно до рівнянь традиційної ДЛ, отримуються рівняння для розрахунку геометричних параметрів та оптичних характеристик БПДЛ. Рівняння радіального положення у межах кожної дифракційної зони БПДЛ, ґрунтуючись на умові рівності їх оптичної довжини шляху виглядає так

$$r_m^2 = 2f_0 mp\lambda_0 + (mp\lambda_0)^2. \quad (2.25)$$

Для умов параксiального наближення $mp\lambda_0 \ll f_0$ рівняння (2.25) отримує наступний вигляд:

$$r_m^2 = 2f_0 mp\lambda_0. \quad (2.26)$$

Для БПДЛ, параксiальна фазова функція описується наступним чином [28]:

$$\varphi(r) = 2\pi ap \left(m - \frac{r^2}{2pf_0\lambda_0} \right), r_{m-1} < r < r_m, \quad (2.27)$$

а непараксiальна [28]:

$$\varphi(r) = 2\pi\alpha p \left(m - \frac{f_0 - \sqrt{r^2 + f_0^2}}{\lambda_0 p} \right), r_{m-1} < r < r_m. \quad (2.28)$$

Максимальна висота рельєфу поверхні визначається рівнянням [28]:

$$h_{\max} = \frac{p\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1}. \quad (2.29)$$

Виходячи з рівнянь (2.25) і (2.29) у БПДЛ по відношенню до звичайної ДЛ збільшені геометричні розміри профілю: радіуси зон збільшені у \sqrt{p} , а глибина – у p разів. Таким чином, багатопорядкова ДЛ є більш технологічною за звичайну.

Функцію пропускання БПДЛ можна виразити рядом Фур'є [28]:

$$t(r) = \sum_{N=-\infty}^{\infty} \exp[-i\pi(\alpha p - N)] \sin c(\alpha p - N) \exp\left[\frac{-i\pi r^2}{p\lambda_0(f_0/N)}\right]. \quad (2.30)$$

Фокусна відстань у N -ому дифракційному порядку для довжини хвилі λ , БПДЛ має вигляд [28]

$$f = \frac{p\lambda_0 f_0}{N\lambda}. \quad (2.31)$$

Треба звернути увагу, що при умові $p\lambda_0/N\lambda = 1$ світло з довжиною хвилі λ фокусується елементом на відстані f_0 . При таких умовах одночасно декілька довжин хвиль із заданого спектрального діапазону фокусуються в одну точку частково усуваючи проблему хроматизму ДЛ. Виходячи з цього робимо висновок, що параметр p – є конструктивним параметром який визначає для яких саме довжин хвиль хроматична аберація лінзи буде відсутня.

Дифракційна ефективність БПДЛ у N -ому дифракційному порядку виглядає так [28]

$$\eta = \sin^2(\alpha p - N). \quad (2.32)$$

Дифракційна ефективність (2.32) рівна одиниці за умов коли аргумент sinc -функції дорівнює нулю. Для цього підходять довжини хвиль, що мають спільний фокус f_0 . Умова максимуму sinc -функції (без урахування дисперсії матеріалу) має вигляд: $\frac{\alpha p}{N} - 1 = 0 \rightarrow \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{p}{N} - 1 = 0$, отже вона збігається з умовою

фокусування в спільний фокус, світла з різними довжинами хвиль (2.31). Таким чином, для БПДЛ робочими стають одразу декілька дифракційних порядків. Вираз розрахунку довжини хвилі, яка у N -му дифракційному порядку фокусується елементом що знаходиться відстані f_0 , має вигляд

$$\lambda = \frac{p\lambda_0}{N}. \quad (2.33)$$

Скористувавшись рівнянням (2.33), параметри p і N можна підібрати такими, що буде забезпечена висока дифракційна ефективність для певної групи довжин хвиль із заданого спектрального діапазону, які будуть сфокусовані на відстані f_0 .

2.5.2. Порівняння оптичних характеристик ДЛ та БПДЛ

Зроблено розрахунки БПДЛ з $f_0 = 50$ мм, $\lambda_0 = 10$ мкм, $p = 12$, робочий спектральний діапазон 8–12 мкм [64,]. На Рис. 2.10 зображені графіки дифракційної ефективності розрахованої БПДЛ. Згідно з ними, світло з довжинами хвиль 12 мкм, 10,9 мкм, 10 мкм, 9,23 мкм, 8,57 мкм, 8 мкм дифракційний елемент фокусує з ефективністю 100%. На верхній шкалі від 15 до 10 позначено робочі дифракційні порядки для всіх довжин хвиль, а цифрою 1 – дифракційна ефективність однопорядкової ДЛ з ідентичними f_0 , λ_0 .

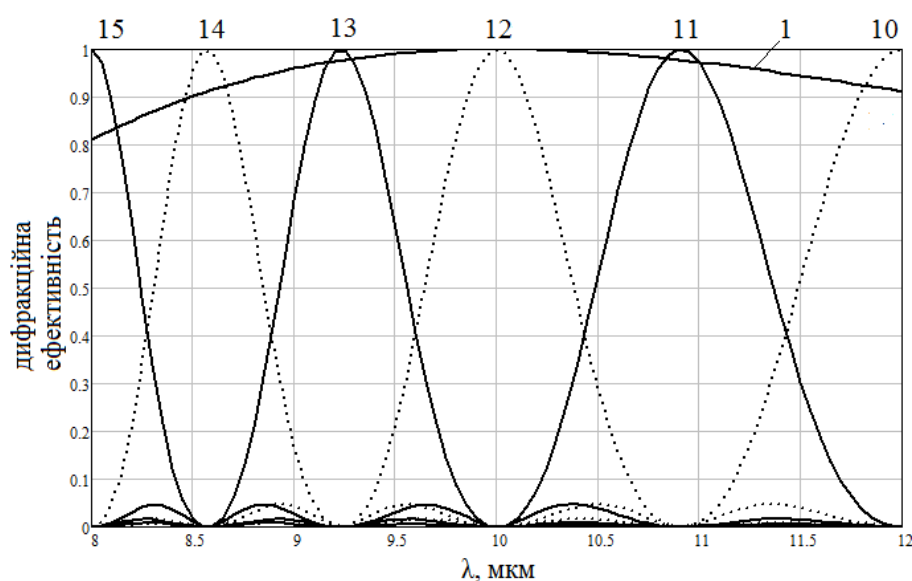


Рис. 2.10. Дифракційна ефективність інфрачервоної БПДЛ з $p = 12$ в спектральному діапазоні 8–12 мкм

Із Рис. 2.10 стає зрозумілим, що все світло із заданого спектрального діапазону окрім світла з розрахунковими довжинами хвиль розподіляється практично між двома дифракційними порядками. За допомогою Рис. 2.10 дуже просто визначити ефективність такого світла у кожному із порядків окремо, залежно від довжини хвилі. Виходячи з цього можна сказати, що унікальність БПДЛ полягає в наступному: змінюючи параметр p можна вибирати в скільки точок (одну чи дві) і з якою ефективністю буде фокусуватися світло із заданою довжиною хвилі.

Характерним для БПДЛ є вдвічі менший хроматизм, ніж для звичайної ДЛ. Відразу декілька довжин хвиль світла фокусуються на відстані 50 мм: 12 мкм, 10,9 мкм, 10 мкм, 9,23 мкм, 8,57 мкм, 8 мкм. Світло з іншими довжинами хвиль фокусуються у дві точки, перед розрахунковою точкою фокусування і за нею.

Із Рис. 2.10 помітно, що при світлі з певними довжинами хвиль БПДЛ може виконувати функції біфокального елемента. Але на відміну від звичайних біфокальних ДЛ, при певних умовах, багатопорядкові можуть бути ахроматичними.

Достатньо сильно зменшений хроматизм БПДЛ підштовхує нас до визначення розміру її поліхроматичного сфокусованого кружка у розрахунковій фокальній площині. Розглянувши Рис. 2.10 робимо висновок, що розмір цього кружка визначають з довжин хвиль, що фокусуються у найвіддаленіших фокальних площинах. Значення f_{\min} і f_{\max} залежать відповідно, від f_0 , параметра p та спектрального діапазону. Легко пересвідчитись, що монохроматичні складові від світла із f_{\min} і f_{\max} у робочій фокальній площині матимуть однакові розміри r , що і відображає Рис. 2.11. Використовуючи співвідношення

$$\frac{r}{R} = \frac{f_{\max} - f_0}{f_{\max}}$$

і вираз (2.31) можна визначити радіальний розмір поліхроматичного кружка у робочій фокальній площині як

$$r = R \left(1 - \frac{n\lambda}{p\lambda_0} \right), \quad (2.34)$$

де λ – довжина хвилі світла із робочого спектрального діапазону, що фокусується у найбільш віддаленій точці. Наприклад, для розрахованої ДЛ $f_{\max} = 55\text{мм}$, $N = 10$, $\lambda = 10,9\text{мкм}$. Згідно отриманого виразу (2.34) розмір поліхроматичного кружка БПДЛ не залежить від її розрахункової фокусної відстані f_0 і при збільшенні параметра p буде зменшуватися.

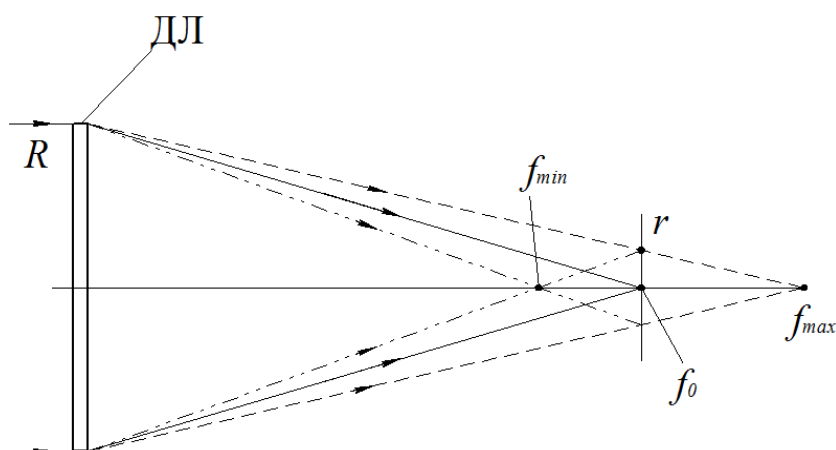


Рис. 2.11. Схема фокусування поліхроматичного світла БПДЛ

На Рис. 2.12 представлено розрахунок відношення розмірів сфокусованого кружка і кружка Ері залежно від світлового діаметру інфрачервоних БПДЛ із різними фокусними відстанями: $f_0 = 50\text{мм}$ (крива 1), $f_0 = 100\text{мм}$ (крива 2), $f_0 = 200\text{мм}$ (крива 3) (Рис. 2.12). Із отриманих результатів видно, що чим більша оптична сила такої ДЛ, тим більший її відносний отвір, при якому розмір сфокусованого кружка рівний розміру кружка Ері. Проте БПДЛ тільки із малим відносним отвором здатна створювати ахроматичні у широкому спектральному діапазоні зображення.

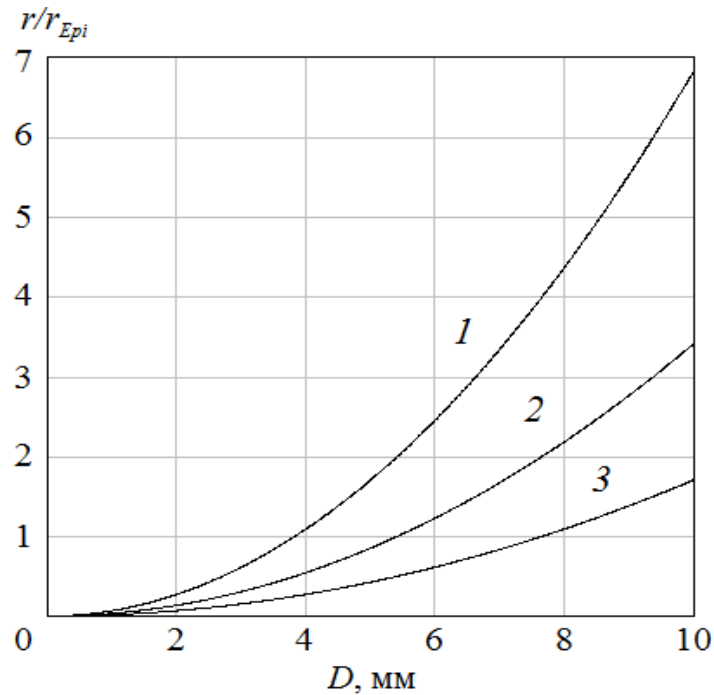


Рис. 2.12. Залежність відношення радіусів сфокусованого кружка (r) і кружка Ері (r_{Epi}) інфрачервоної БПДЛ від світлового діаметру D для інфрачервоної БПДЛ у спектральному діапазоні 8-12 мкм при $p = 12$ з 1 - $f_0 = 50$ мм ,
2 - $f_0 = 100$ мм , 3 - $f_0 = 200$ мм

2.6. Метод корекції сферичної аберації гібридної лінзи

У даному підпункті представлено метод корекції сферичної аберації гібридної лінзи. В основі методу лежить рівняння, що дозволяє для гібридної лінзи отримати розрахункові довжину хвилі і фокусну відстань її дифракційної складової, сферична аберація котрої у межах заданого світлового діаметра дорівнює сферичній аберації рефракційної складової, але протилежна за знаком.

Розглянуто сферичну аберацію інфрачервоної ДЛ з $\lambda_0 = 10$ мкм , $f_0 = 100$ мм , $D/f_0 = 0,25$ у спектральному діапазоні 8–12 мкм [23]. У межах даного світлового діаметру розміщується 77 дифракційні зони, а ширина останньої складає 0,081 мм. На рис. 2.13 зображена сферична аберація ДЛ, зони якої розраховані за допомогою параксіального (2.27) і непараксіального (2.28) рівнянь.

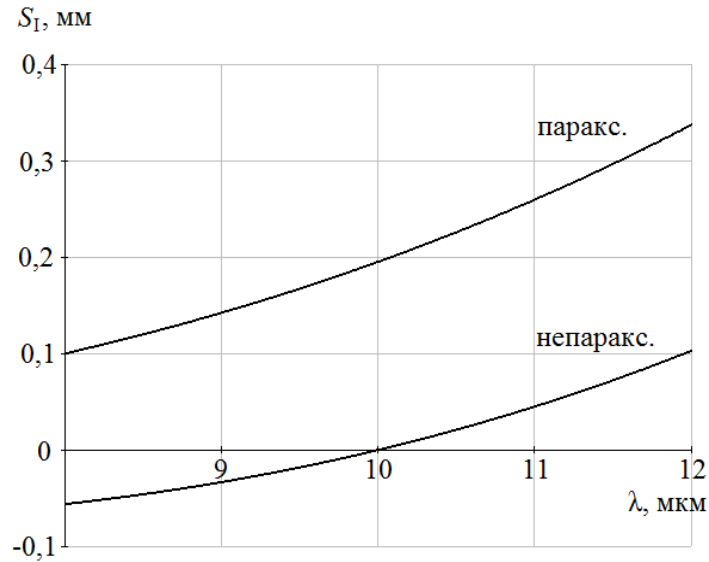


Рис. 2.13. Сферична аберація ДЛ

Очевидно, що у заданому спектральному діапазоні при $\lambda \neq \lambda_0$ сферична аберація параксіальної ДЛ перевищує сферичну аберацію непараксіальної ДЛ у $\left| \frac{1}{1 - \alpha^2} \right|$ разів, що і відображає рис. 2.13. Особливістю непараксіальної ДЛ є її від'ємне значення сферичної аберації для $\lambda < \lambda_0$. Тобто, зі збільшенням світлового діаметру ДЛ її фокусна відстань по відношенню до параксіальної збільшується. А для світла з $\lambda > \lambda_0$, як і для рефракційної лінзи, фокусна відстань зменшується. Тому такий елемент здатний компенсувати сферичну аберацію рефракційної лінзи у межах усього світлового діаметра [23].

Таким чином, якщо відома сферична аберація рефракційної лінзи $S_{I_{\text{реф}}}$, то можна підібрати такі розрахункові параметри λ_0 , f_0 , що для світла з довжиною хвилі λ і фокусною відстанню f ДЛ вноситиме сферичну аберацію $S_{I_{\text{диф}}} = -S_{I_{\text{реф}}}$. На основі виразу першої суми Зейделя $S_I^d = \frac{r^4}{f_0^3} \left(\frac{\lambda^3 - \lambda \lambda_0^2}{\lambda_0^3} \right)$ для розрахунку необхідного значення λ_0 ДЛ було отримано наступний вираз: [23]

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda^2 \left(1 - \frac{S_{I_{\text{диф}}} f^3}{r^4} \right)}. \quad (2.35)$$

При використанні виразу (2.35) завжди необхідно враховувати знак сферичної аберації рефракційної частини $S_{I_{\text{реф}}}$. Якщо $S_{I_{\text{реф}}} < 0$, то $S_{I_{\text{диф}}} > 0$.

Тоді на вибір значення f накладається умова $f < \sqrt[3]{\frac{r^4}{S_{\text{Iдиф}}}}$ (обмежується максимальне додатне значення f). Якщо $S_{\text{Iреф}} > 0$, то $S_{\text{Iдиф}} < 0$. Тоді умова набуває вигляду $f < -\sqrt[3]{\frac{r^4}{S_{\text{Iдиф}}}}$ (обмежується мінімальне від'ємне значення f).

На рис. 3.17 (крива 1) показана сферична аберація плоско-випуклої германієвої лінзи ($R_1 = 300,7 \text{ мм}$, $R_2 = \infty$, $f = 100 \text{ мм}$) залежно від радіального розміру лінзи для світла з довжиною хвилі $\lambda = 10 \text{ мкм}$. Для $r = 12,5 \text{ мм}$ сферична аберація лінзи набуває значення $S_{\text{Iреф}} = 0,0226 \text{ мм}$, що і відображає крива 1 (розрахунок сферичної аберації наведено у додатку Б). На основі запропонованого рівняння отримано розрахункові параметри ДЛ, котра світло з довжиною хвилі $\lambda = 10 \text{ мкм}$ фокусує на відстані $f = 100 \text{ мм}$, і вносить сферичну аберацію $S_{\text{Iдиф}} = -0,0226 \text{ мм}$. Розрахункові довжина хвилі λ_0 і фокусна відстань f_0 дорівнюють $13,9 \text{ мкм}$ і $71,43 \text{ мм}$ відповідно.

На Рис. 2.14 зображена сферична аберація розрахованої ДЛ для світла з довжиною хвилі $\lambda = 10 \text{ мкм}$ (крива 2). Як видно з рисунка, у межах усього світлового радіуса сферична аберація ДЛ і сферична аберація рефракційної лінзи мають однакові значення, але протилежні за знаком. Тому отримана у результаті поєднання рефракційної і дифракційної компонент гібридна лінза для світла з довжиною хвилі $\lambda = 10 \text{ мкм}$ створює ідеальну сферичну хвилю. Очевидно, що фокусна відстань розрахованої монохроматичної гібридної лінзи дорівнює 50 мм (вважаємо лінзу тонким елементом), а її відносний отвір – $D/f = 0,5$ [57].

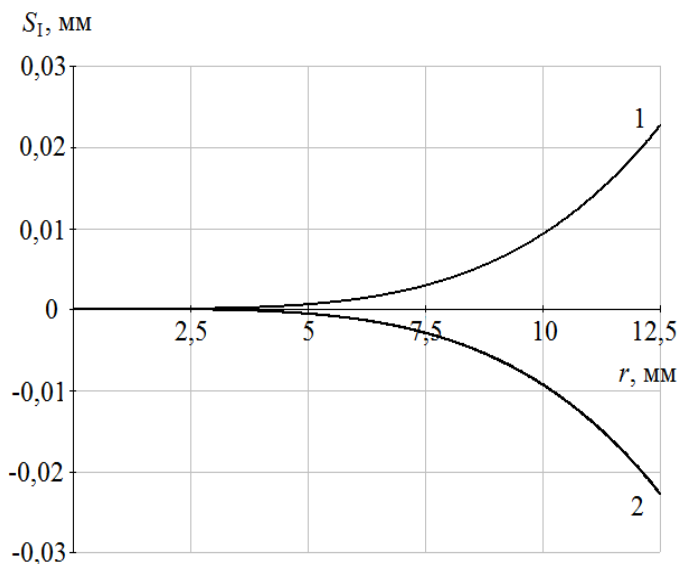


Рис. 2.14. Сферичні аберації для 1 - плоско-випуклої германієвої лінз;
2 - ДЛ із $\lambda_0 = 13,9 \mu\text{м}$, $f_0 = 71,43 \text{ мм}$ для довжин хвиль $\lambda = 10 \mu\text{м}$

Звісно, розрахована для $\lambda_0 = 10 \mu\text{м}$, $f_0 = 50 \text{ мм}$ непараксіальна ДЛ також не вносить сферичну аберацію, проте така лінза має 154 дифракційні зони, а ширина останньої складає $0,041 \text{ мм}$ (дифракційна поверхня гібридної лінзи має 77 зон, а ширина останньої – $0,081 \text{ мм}$). Тому проектування саме гібридної лінзи є більш технологічним.

Коефіцієнт фазової затримки дифракційної компоненти розрахованої гібридної лінзи дорівнює 1,39 (див. вираз (2.22)), тому її дифракційна ефективність у робочому першому дифракційному порядку не перевищує 60% (див. вираз (2.35)). Зменшення розрахункової довжини хвилі λ_0 призведе до збільшення дифракційної ефективності, проте і сферична аберація гібридної лінзи також збільшиться (Рис. 2.15).

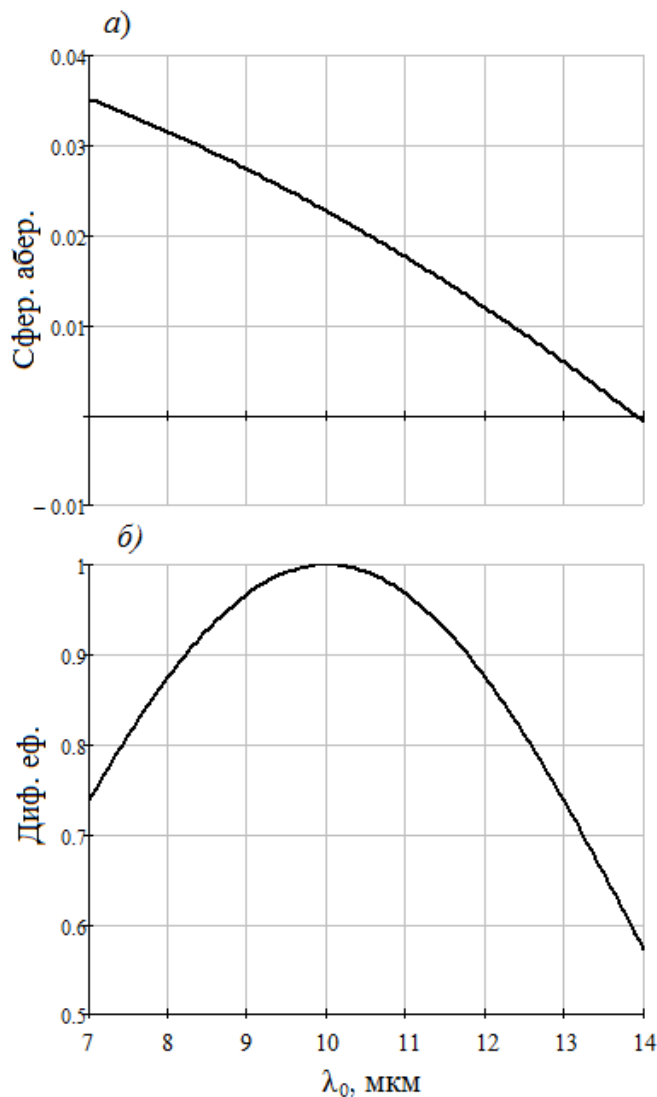


Рис. 2.15. Сферична аберація (а) та дифракційна ефективність (б) гібридної лінзи для довжини хвилі 10 мкм залежно від розрахункової довжини хвилі

Згідно Рис. 2.15 часткова компенсація сферичної аберації рефракційної лінзи матиме місце тоді, коли $\lambda_0 > 10$ мкм. Вибір розрахункової довжини хвилі дифракційної частини гібридної лінзи визначається компромісом між ефективністю та сферичною аберацією.

На рис. 2.16 показані сферичні аберації при $\lambda = 10$ мкм для трьох оптичних елементів, відносні отвори і фокусна відстань котрих дорівнюють 0,5 і 50 мм відповідно. Крива 1 – сферична аберація германієвої плоско-випуклої лінзи, крива 2 – гібридної лінзи з $\lambda_0 = 12,5$ мкм, крива 3 – гібридної лінзи з $\lambda_0 = 10$ мкм. Як видно з рис. 2.16, для $r = 12,5$ мм сферична аберація рефракційної лінзи

перевищує сферичну аберацію гібридних лінз з $\lambda_0 = 12,5 \text{ мкм}$ і $\lambda_0 = 10 \text{ мкм}$ у 20 і 8 разів відповідно.

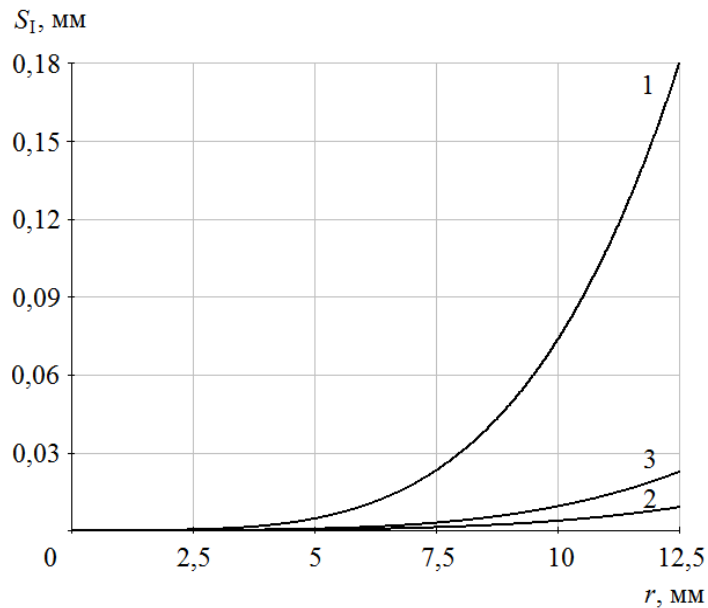


Рис. 2.16. Сферична аберація лінз з $D/f = 0,5$, $f = 50 \text{ мм}$ для $\lambda = 10 \text{ мкм}$. 1 – рефракційна лінза, 2 – гібридна лінза з $\lambda_0 = 12,5 \text{ мкм}$, 3 – гібридної лінзи з $\lambda_0 = 10 \text{ мкм}$

Очевидно, що із-за значного хроматизму ДЛ отримана гібридна лінза обмежена монохроматичним застосуванням. Для того, щоб така лінза мала скориговану сферичну аберацію у широкому спектральному діапазоні, її ДЛ має характеризуватися малою оптичною силою. На основі цього твердження та запропонованого виразу (2.35) розраховано гібридну лінзу із практично виправленою сферичною аберацією у широкому спектральному діапазоні. В якості рефракційної складової обрано плоско-випуклу германієву лінзу ($R_1 = 150,22 \text{ мм}$, $R_2 = \infty$, $f = 50 \text{ мм}$) із $D/f = 0,5$, перша сума Зейделя якої складає $0,1765 \text{ мм}$. Тоді ДЛ має вносити сферичну аберацію $-0,1765$ і мати велику фокусну відстань. Наступні розрахунки будуть проводитися для довжини хвилі 10 мкм , оскільки сферична аберація рефракційної лінзи практично не залежить від довжини хвилі, а фокусна відстань ДЛ обирається великою. Максимальна величина фокусної відстані обмежується тим, що ДЛ повинна мати не менше двох дифракційних зон, оскільки за наявності лише однієї зони ДЛ

перетворюється на асферичну поверхню, що не виконує бажаної абераційної корекції. Використовуючи вираз (2.35) і формулу $R_m = \sqrt{2\lambda f m}$ [21] отримано, що при $\lambda = 10 \text{ мкм}$ і $f = 2600 \text{ мм}$ розрахункові параметри ДЛ дорівнюють $\lambda_0 = 3,565 \text{ мм}$ і $f_0 = 7,293 \text{ мм}$, радіус першої зони складає $8,044 \text{ мм}$, а другої – $12,445 \text{ мм}$. За допомогою виразу першої суми Зейделя легко пересвідчитися, що отримана ДЛ із світловим діаметром $D = 25 \text{ мм}$ для довжини хвилі 10 мкм вносить сферичну аберацію рівну $-0,1765$, що відображено на рис. 2.17, де крива 1 – залежність сферичної аберації від радіального розміру рефракційної складової, крива 2 – дифракційної.

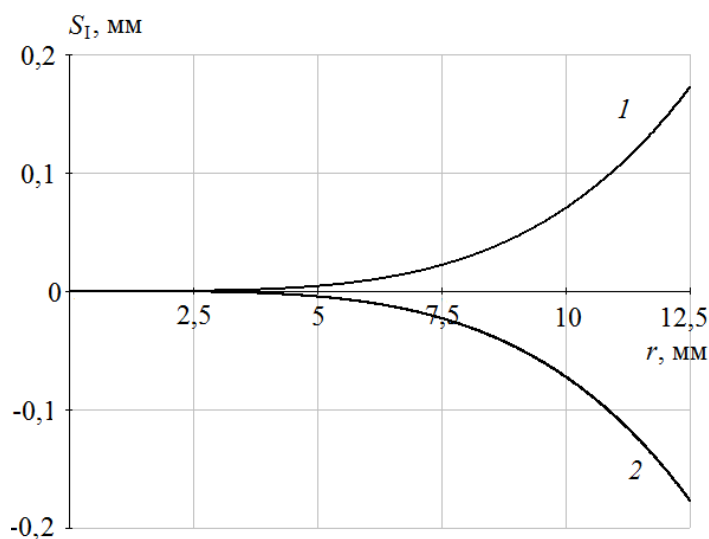


Рис. 2.17. Сферичні аберації для 1 - плоско-випуклої германієвої лінзи; 2 - ДЛ із $\lambda_0 = 3,565 \text{ мм}$, $f_0 = 7,293 \text{ мм}$ для довжини хвилі 10 мкм

Таким чином, шляхом нанесення дифракційних канавок на плоску поверхню рефракційної лінзи можна скоригувати її сферичну аберацію для бажаної довжини хвилі, або значно зменшити для всього робочого спектрального діапазону.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі були детально описані методи проектування ДЛ. Були розроблені теоретичні основи проектування ДЛ. Запропоновано методику проектування, яка дозволяє проектувати ДЛ що вільна від астигматизму, має

незначні дисторсію і кривизну поля . В рефракційно-дифракційній ОС можна виконати абераційну корекцію за допомогою ДЛ..

У основі роботи методик проектування лежать оптичні характеристики БПДЛ та перша сума Зейделя.

На прикладі приведених розрахунків рефракційно-дифракційних систем доведено, що теоретичні властивості ДОЕ стверджуються на практиці

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

На сьогодні проектування рефракційно-дифракційних ОС обмежується використанням ДЛ для корекції хроматичних і/або термічних аберацій ОС. Зазвичай, такі ДЛ є параксіальними та мають малі відносні отвори, тому суттєво не впливають на оптичну силу ОС. Проте наступним етапом розвитку рефракційно-дифракційного компонування ОС є використання непараксіальних ДЛ, які завдяки здатності формування асферичного хвильового фронту можуть бути використаними для корекції монохроматичних аберацій. [31]

У попередньому розділі була описана математична модель формування зображення непараксіальною ДЛ. У результаті аналізу було показано, що така ДЛ вільна від астигматизму, кривизни поля і дисторсії, а її сферична аберація і кома в значній мірі залежить від співвідношення між розрахунковою λ_0 та робочою λ довжинами хвиль (мають від'ємне значення при $\lambda < \lambda_0$). Тому λ_0 можна підібрати такою, щоб аберація ДЛ компенсувала аберацію рефракційної лінзи. На основі цієї ідеї розроблено методи корекції сферичної аберації та аберації коми рефракційної ОС непараксіальною ДЛ, як у монохроматичному, так і поліхроматичному світлі.

3.1 Проектування інфрачервоного гібридного об'єктива

Розглянемо рефракційний дволінзовий інфрачервоний об'єктив із відносним отвором $D/f = 0,66$, фокусною відстанню $f = 100$ мм та кутом поля зору $2\omega = 4,6^\circ$ для роботи у спектральному діапазоні 8–12 мкм (рис. 3.1). На рис. 3.2 показано графіки аберацій даного об'єктива. Через великі значення показників заломлення матеріалів, кривизна поля практично відсутня. Проте від'ємний показник астигматизму обмежує корисне поле зору та якість зображення на периферії. Поєднання таких матеріалів як кремній і германій гарантує ахроматизацію об'єктива, але пропускання кремнію зазвичай обмежує його використання для світла із меншими довжинами хвилі (3–5 мкм).

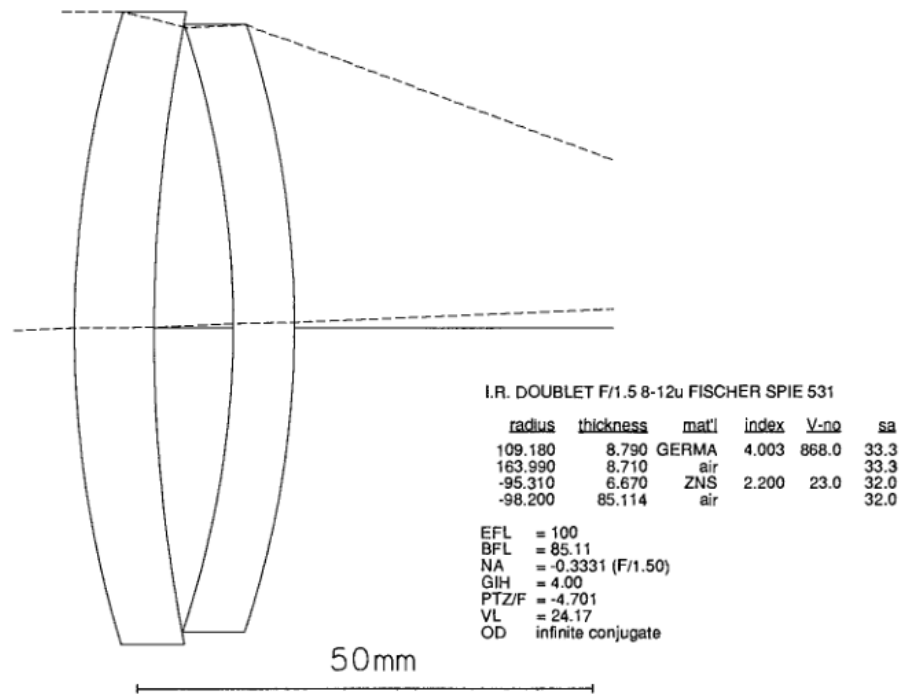


Рис. 3.1 Інфрачервоний рефракційний об'єктив із відносним отвором $D/f = 0,66$, фокусною відстанню $f = 100$ мм та кутом поля зору $2\omega = 4,6^\circ$

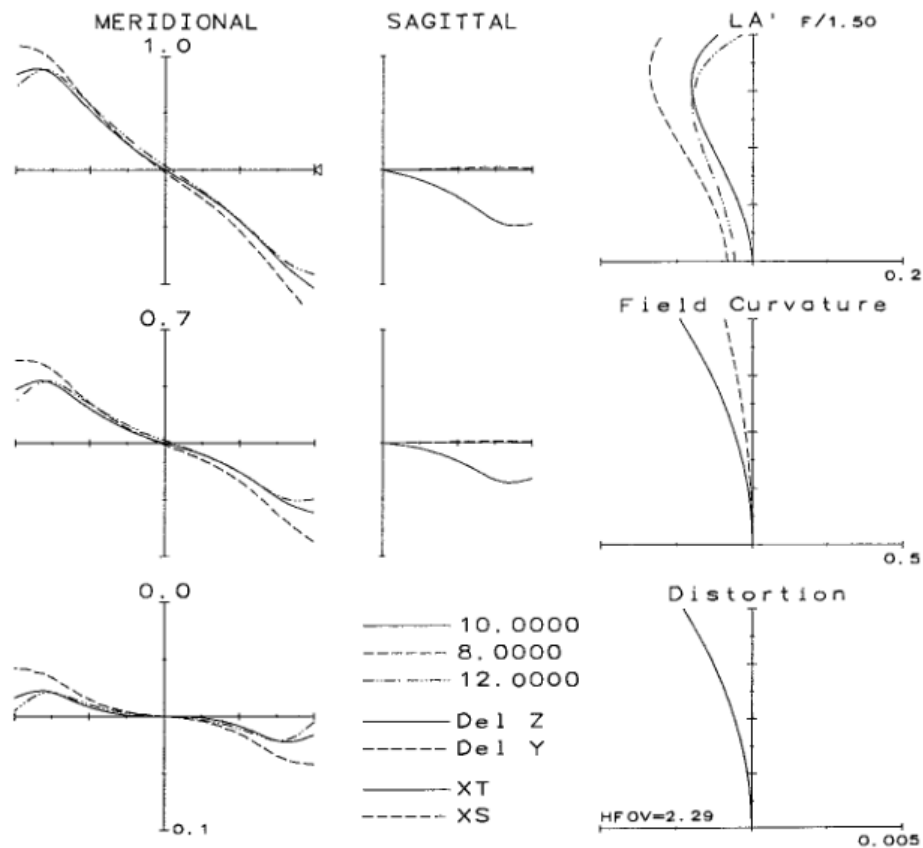


Рис. 3.2. Аберації об'єктива

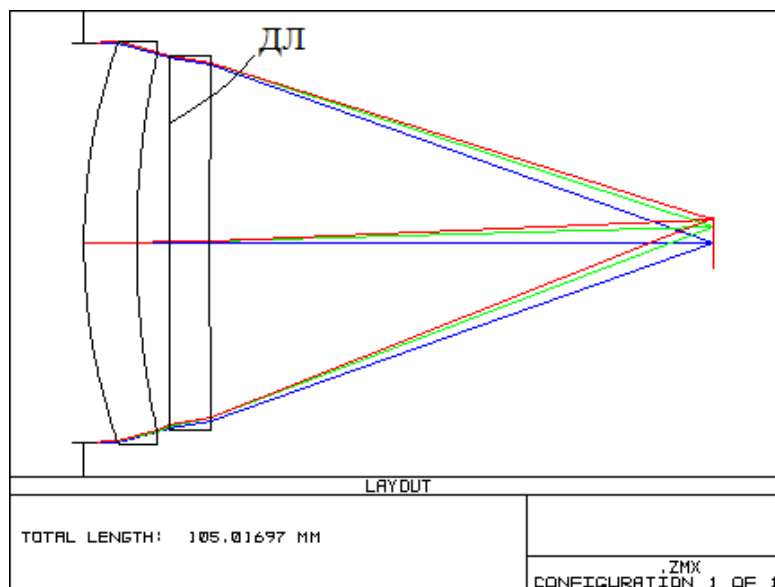


Рис. 3.3. Інфрачервоний гібридний об'єктив

На рис. 3.3 зображено спроектовано гібридний об'єктив використовуючи запропоновані методи корекції монохроматичних аберації. Спектральний діапазон об'єктиву 8–12 мкм, в якого, як і в рефракційного, $D/f = 0,66$, $f = 100\text{ мм}$, $2\omega = 4,6^\circ$. На рис. 3.4 Представлені конструктивні параметри спроектованого об'єктива. Як видно із рис. 3.3, третя поверхня об'єктива плоска, з нанесеними двома дифракційними зонами в межах світлового діаметра 62,4 мм. Фазові коефіцієнти дифракційного елемента мають наступні значення: $A_1 = -18,833541$, $A_2 = 9,052945$, $A_3 = -2,959730$. Фокусна відстань ДЛ дорівнює 20286,3 мм.

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	0.000000		33.300000
2	Standard	100.430000	8.790000	GERMANIUM	33.530447
3	Standard	145.870000	5.500000		31.874627
4	Binary 2	Infinity	6.670000	ZNS_IR	31.199289
5	Standard	1296.310000	84.050000		30.160644
IMA	Standard	Infinity	-		4.237381

3.4. Конструктивні параметри інфрачервоного гібридного об'єктива

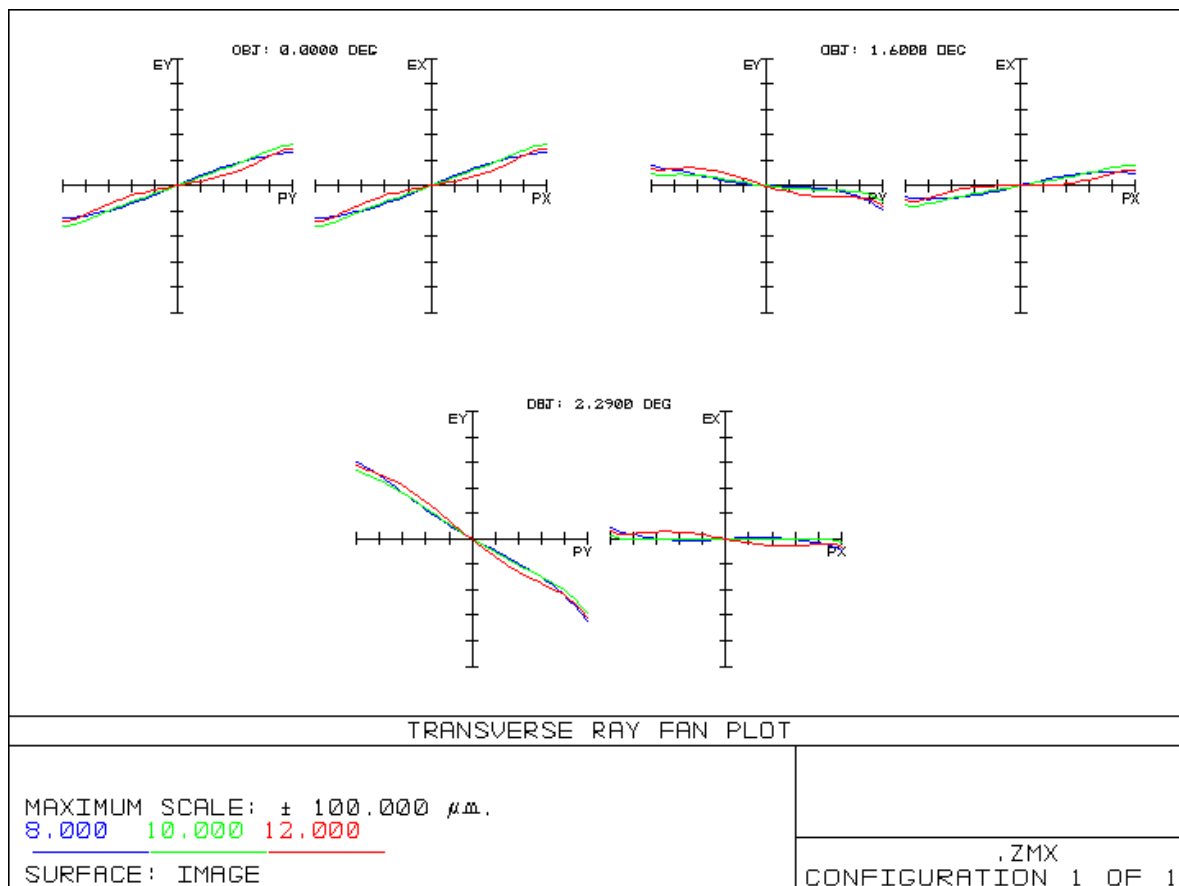


Рис. 3.5. Діаграма аберацій променів гібридного об'єктива

Відповідно до рис. 3.5 ДЛ скоригувала кому але в зображенні в значній мірі присутній астигматизм. Розмір сфокусованої плями гібридного об'єктива вдалося зменшити в 3,5 рази для кута поля зору $3,2^\circ$ і в 1,7 для кута $4,6^\circ$ у порівнянні із рефракційним. Графіки аберацій кривизни поля, дисторсії та поздовжнього хроматизму гібридного об'єктива (рис. 3.6), майже не змінилися у порівнянні з абераціями рефракційного об'єктива.

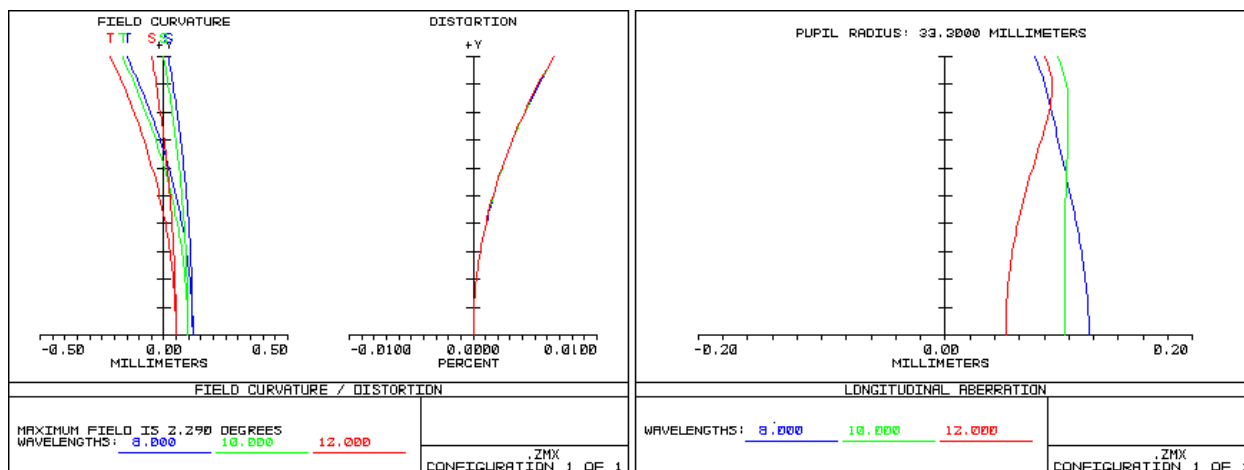


Рис. 3.6. Кривизна поля, дисторсія та поздовжній хроматизм
гібридного об'єктива

Розглянемо інший інфрачервоний рефракційний об'єктив (рис. 3.7), що має аналогічні оптичні характеристики: $D/f = 0,66$, $f = 100\text{ мм}$, $2\omega = 4,6^\circ$, робочий спектральний діапазон 8–12 мкм. На рис. 3.8 зображені графіки аберацій даного об'єктива. Із порівняння рис. 3.2 і рис. 3.8 помітно, що ці об'єктиви мають практично однакове значення аберацій. На основі рефракційного об'єктива було розроблено гібридний, як і у попередньому випадку, з конструктивними параметрами представленими на рис. 3.9. Третя поверхня об'єктива є плоскою і виконана у вигляді ДЛ із двома дифракційними зонами: $A_1 = -15,901181$, $A_2 = 5,682220$, $A_3 = -2,413135$ (фокусна відстань ДЛ дорівнює 26894,2 мм).

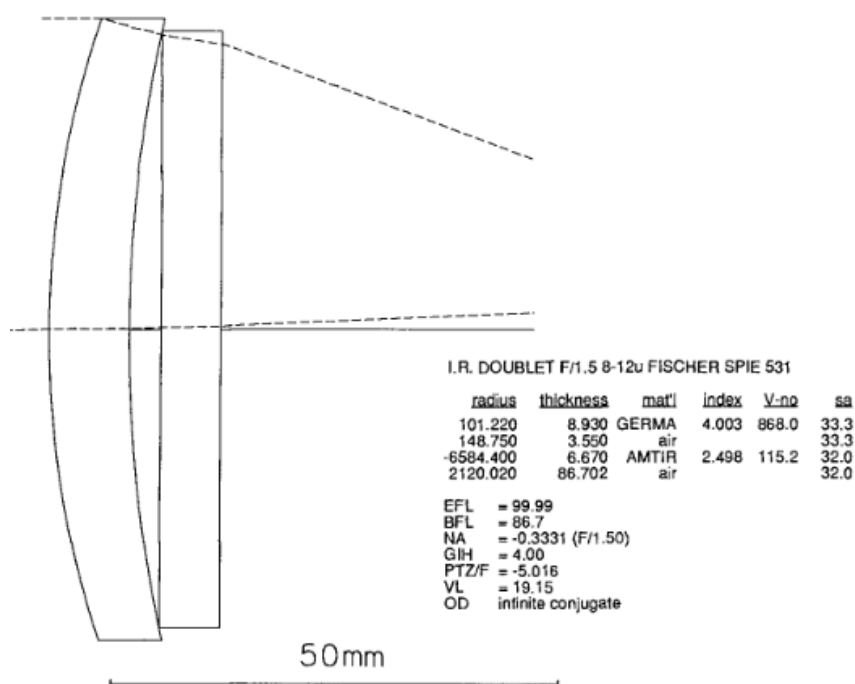


Рис. 3.7. Інфрачервоний рефракційний об'єктив із відносним отвором $D/f = 0,66$, фокусною відстанню $f = 100\text{ мм}$ та кутом поля зору $2\omega = 4,6^\circ$

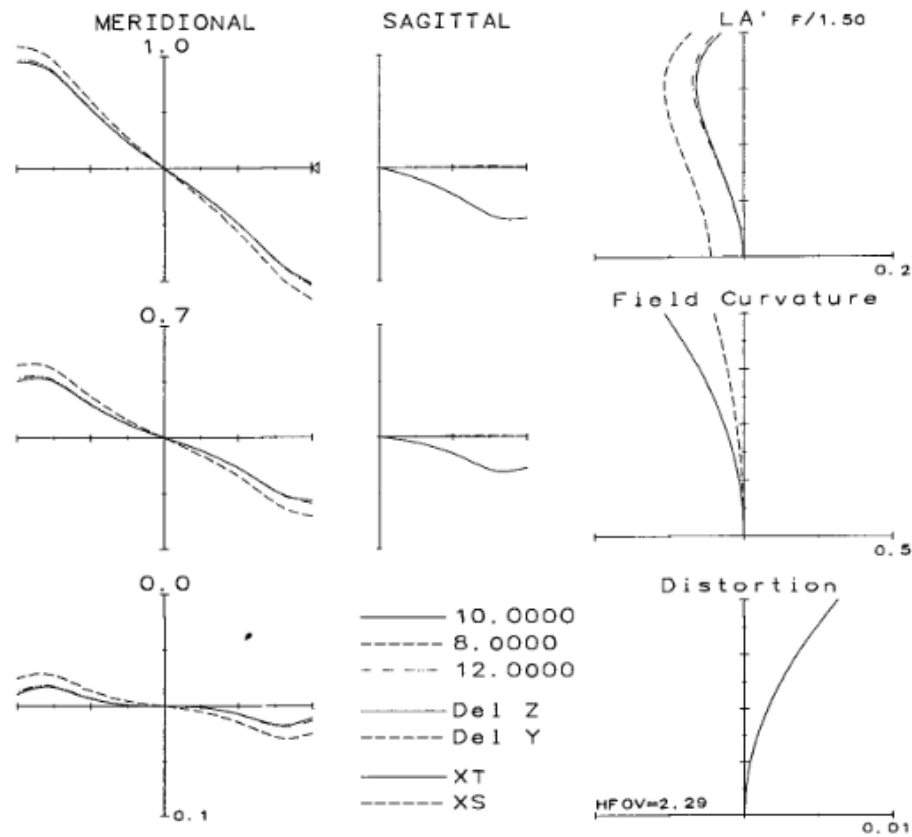


Рис. 3.8. Аберації об'єктива

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	0.000000		33.000000
2	Standard	101.649391	7.000000	GERMANIUM	33.223247
3	Standard	151.310502	3.550000		32.028059
4	Binary 2	Infinity	10.000001	AMTIR1	31.986769
5	Standard	1645.156292	86.539140		30.647224
6	Standard	Infinity	0.000000		4.042096
IMA	Standard	Infinity	-		4.042096

Рис. 3.9. Конструктивні параметри інфрачервоного гібридного об'єктива

На рис. 3.10 зображена діаграма аберацій променів гібридного об'єктива, а кривизна його поля, дисторсія та поздовжній хроматизм на рис. 3.11. Ідентично попередньому випадку кривизна поля, дисторсія та поздовжній хроматизм суттєво не зазнали змін, але вдалося зменшити кому завдяки ДЛ, як результат сфокусована пляма гібридного об'єктива зменшена більш ніж у 4 і більш ніж 1,5 рази для кутів поля зору $3,2^\circ$ та $4,6^\circ$ відповідно.

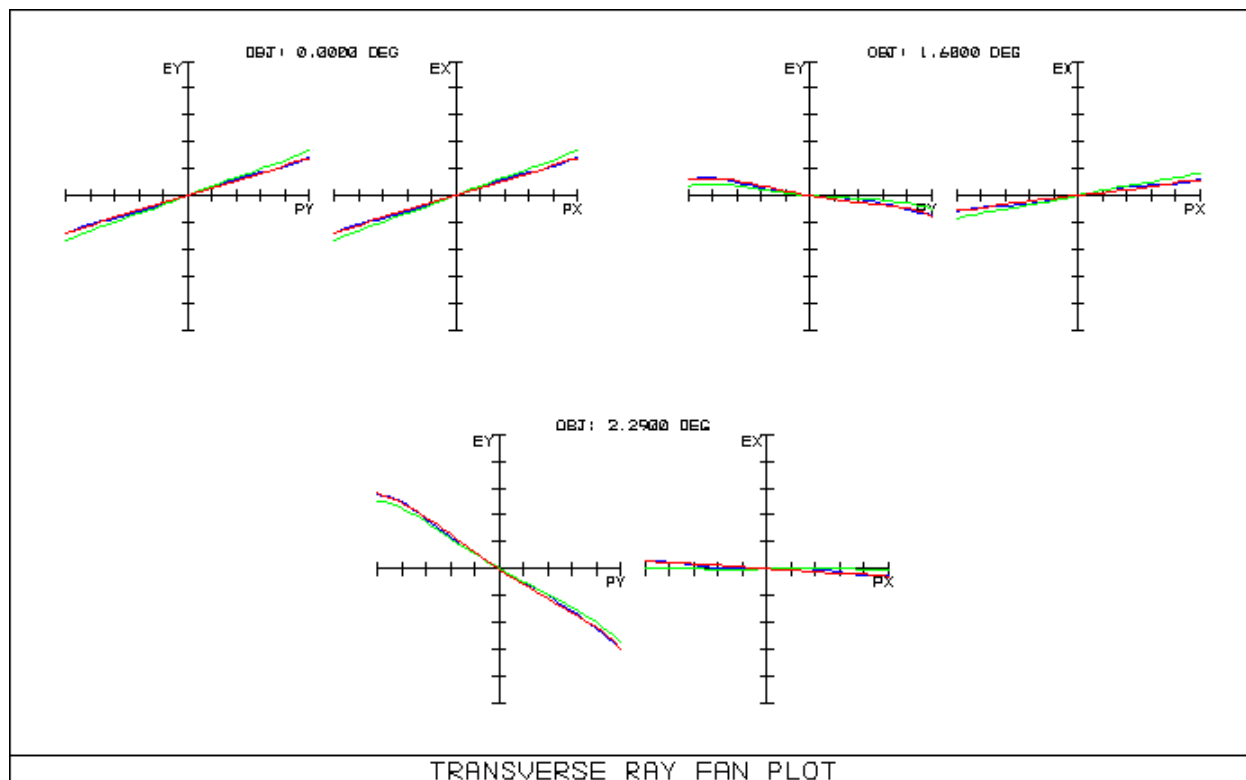


Рис. 3.10. Діаграма аберацій променів гібридного об'єктива

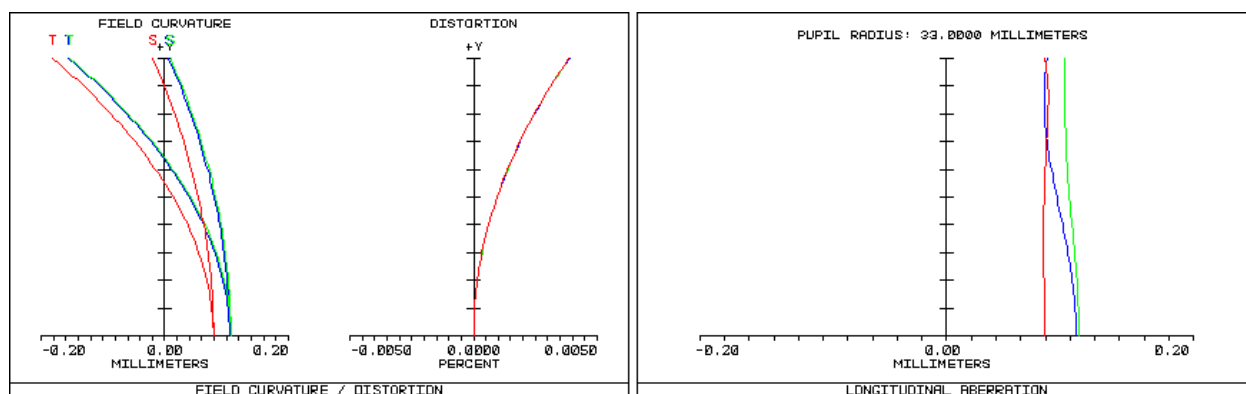


Рис. 3.11. Кривизна поля, дисторсія та поздовжній хроматизм гібридного об'єктива

Виходячи з цього, спроектовані гібридні об'єктиви підтверджують вірність запропонованих методів корекції сферичної аберації та коми рефракційної ОС за допомогою ДЛ. Гібридна ОС в порівнянні із рефракційним аналогом, має вищу якість зображення з меншою кількістю сферичних поверхонь.

3.2. Проектування багатопорядкової дифракційної лінзи для роботи в ІЧ діапазоні

Пропонується ДЛ розрахувати як багатопорядкову із $p = 12$. Тоді у межах світлового діаметру гібридної лінзи розміщується 6 дифракційних зон, а ефективність для робочої довжини хвилі складає 100%.

На основі виразів (2.25) і (2.29) розраховано мікропрофіль параксіальної германієвої БПДЛ, ($f_0 = 50$ мм, $\lambda_0 = 10$ мкм, $p = 12$). Лінза складається із 13-ти дифракційних зон, максимальна глибина яких – 0,04 мм (показник заломлення германію обрано рівним 4). Радіальне положення і період 13-ої зони дорівнюють 12,49 мм 0,49 мм відповідно. Таким чином, спроектовано світлосильну ДЛ, що має достатньо технологічний мікропрофіль.

Розраховану БПДЛ імпортовано у програму «ZEMAX», де було проведено аналіз її оптичних характеристик. На рис. 3.12 зображені МПФ, точкова діаграма, різниця оптичної довжини ходу та діаграма аберацій променів даної лінзи для довжин хвиль 8, 10 і 12 мкм. Як видно із рис. 3.12 така ДЛ, на відміну від звичайної ДЛ (див. рис. 3.1), може успішно використовуватися при поліхроматичному освітленні.

Слід зазначити, що оптичні характеристики отриманої БПДЛ у значній мірі співпадають з оптичними характеристиками звичайної плоско-випуклої германієвої лінзи (див. рис. 3.8). Обидві лінзи мають практично однакове значення сферичної аберації, що відображають їх діаграми аберацій променів. Така схожість пояснюється тим, що радіальне положення дифракційних зон і глибина канавок БПДЛ були розраховані у параксіальному наближенні (вирази (2.25) і (2.29)). На наступному етапі дослідження було спроектовано БПДЛ із аналогічними фокусною відстанню та відносним отвором, радіальне положення зон якої описується виразом (3.1), а глибина канавок – виразом (3.10). Отриману лінзу було імпортовано у програму «ZEMAX».

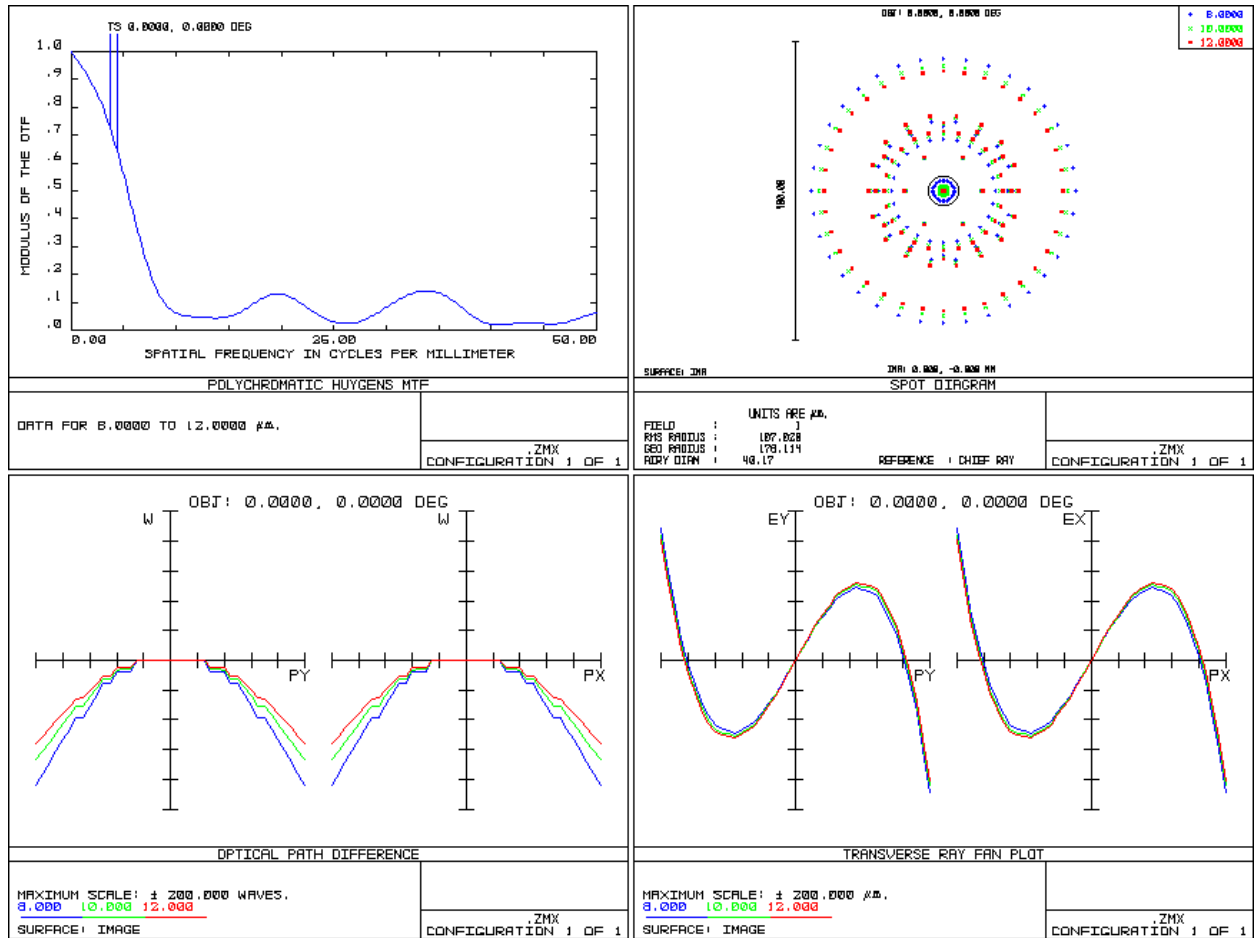


Рис. 3.12. Поліхроматичні МПФ, точкова діаграма, різниця оптичної довжини ходу та діаграма аберацій променів параксіальної германієвої БПДЛ

$$\text{з } f_0 = 50 \text{ мм}, D/f_0 = 0,5, \lambda_0 = 10 \text{ мкм}$$

На рис. 3.13 представлені поліхроматичні точкова діаграма та діаграма аберацій променів непараксіальної германієвої БПДЛ з $f_0 = 50$ мм, $D/f_0 = 0,5$, $\lambda_0 = 10$ мкм. Сферична аберація такої лінзи по відношенню до параксіальної зменшена у 3 рази, що і відображає рис. 3.13. Слід зазначити, що навіть у випадку непараксіального розрахунку, оптичні характеристики світлосильної лінзи не є дифракційно-обмеженими. Це пояснюється тим, що вираз (2.28) є не достатньо точним, оскільки його вивід супроводжується певними спрощеннями.

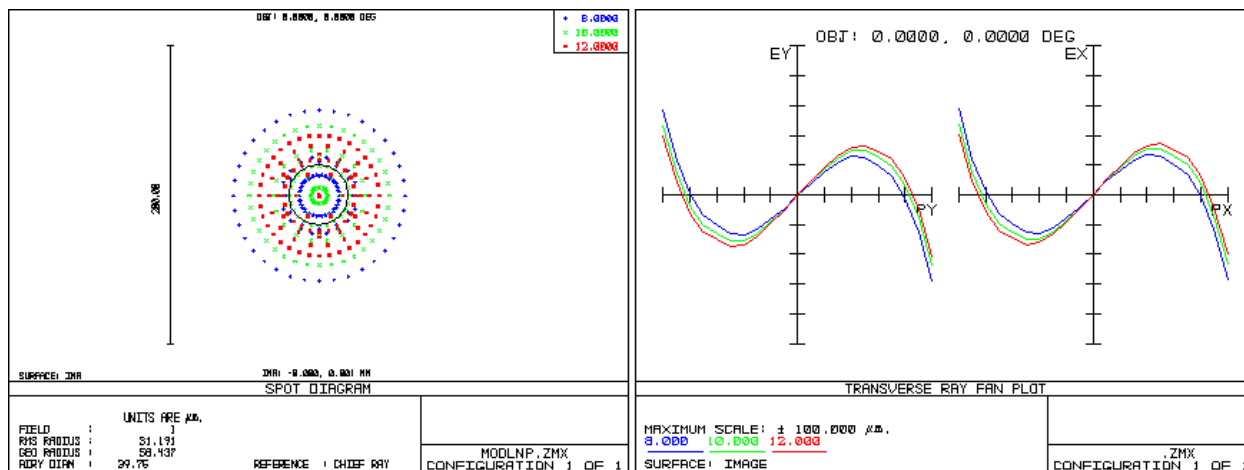


Рис. 3.13. Поліхроматичні точкова діаграма та діаграма аберацій променів непараксіальної германієвої БПДЛ з $f_0 = 50$ мм, $D/f_0 = 0,5$, $\lambda_0 = 10$ мкм

Таким чином, підтверджено, що БПДЛ із мікропрофілем, розрахованим за допомогою запропонованого непараксіального методу, мають вищу якість зображення (менше значення сферичної аберації), ніж БПДЛ із параксіальним мікропрофілем.

Висновки до розділу 3

У даному розділі здійснено експериментальний розрахунок гібридного ІЧ об'єктиву з дифракційною лінзою за допомогою розробленого методу, на основі готового рефракційного об'єктиву.

Проведеними розрахунками й діаграмами аберацій доведено, що використання дифракційної лінзи може покращити якість зображення оптичної системи. Отримані результати свідчать, що розраховані об'єктиви за якістю зображення є збалансованими по всьому полю зору або практично дифракційно-обмеженими та переважають свої аналоги з виключно рефракційними поверхнями.

Таким чином, застосувавши непараксіальну ДЛ вдалося зменшити кількість сферичних поверхонь інфрачервоної ОС та підвищити якість її зображення. Підтверджено, що непараксіальний метод є потужним засобом, завдяки якому можна здійснювати параметричний синтез оптичних систем з дифракційними елементами, які задовольнятимуть задані технічними вимогами параметри.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

«ДИФРАКЦІЙНА ЛІНЗА ІЗ ЗАДАНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ»

4.1 Опис ідеї проекту

Дифракційна лінза належить до дифракційних оптичних елементів. Використовуються в об'єктивах та вимірювальних системах. Представлений метод був застосований для ІЧ об'єктива для підвищення якості зображення, буде цікавий для військових та охоронних систем по виявленню та ідентифікації об'єктів спостереження.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Об'єктив тепловізора	Військова	Зменшена вага пристрою, вигідна ціна, висока точність
	Охоронна	

Метод буде застосовуватись в охоронних системах, потрібно зробити його компактним, легким та дешевим

Визначимо необхідні строки реалізації, трудові та матеріальні ресурси, та головні цілі нашого приладу.

Таблиця 4.2. Інформаційна карта проекту

1. Назва проекту	Дифракційна лінза з заданими характеристиками
2. Автори проекту	Чікіда Олексій Ігорович, Васильковська Інна Олегівна
3. Коротка анотація	Покращення зображення тепловізору
4. Термін реалізації проекту	12 місяців
5. Необхідні ресурси	Трудові ресурси: ІТ спеціаліст, маркетолог, менеджер. Матеріальні ресурси: Приміщення, комп'ютери, столи, стільці, 2 осцилографи, 2 мультиметри, 2 вольтметри, 2 генератора частоти, 2

	амперметри, лава оптична, лазерна установка.
	Фінансові ресурси: 1.5 млн. грн.
6. Опис проблеми, яку вирішує проект	Основною проблемою продукту є великі габарити, велика вага та висока ціна.
8. Головні цілі та завдання проекту	Створити доступний продукт, який зможе конкурувати з великими гравцями на ринку.
9. Очікувані результати	В результаті очікується створити якісний компактний продукт який буде задовольняти усі потреби споживачів, за низької ціни

Пропонується новітня технологія, що має покращити тепловізори покращенням зображення та зменшенням ваги, габаритів та ціни. Для цього необхідні високо кваліфіковані працівники, новітнє обладнання та великі кошти.

Потрібно визначити сильні та слабкі сторони проекту порівнявши його з аналогами конкурентів аби розуміти чи буде наш товар конкурентоспроможним.

Таблиця 4.3. - Визначення сильних та слабких характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	S (сильна сторона)
		Мій Проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3		
1.	Економічність	1200\$	1600\$	2500\$	3000\$		+
2.	Призначення (технічні)	Простий прилад та проста програма	Простий прилад, велика та складна програма з багатьма непотрібними функціями	Складний прилад, відносно складна та велика програма	Складний прилад, складна та велика програма		+
3.	Надійність	Гарантія 5 років	Гарантійний термін - 5 років	Гарантійний термін - 5 років	Гарантійний термін - 7 років		+
4.	Ергономія	Високояк	Легка вага	Високояк	Високояк		+

	чні	існе зображення, простота у використанні		існе зображення	існе зображення		
5.	Транспор-табельні	Легко транспортується	Легко транспортується	Легко транспортується	Транспортується в особливих умовах		+

Сильна сторона ідеї проекту полягає у його дешевизні, простоті та високоякісному зображенні, в порівнянні з іншими конкурентами, слабких сторін не виявлено. Тому найважливішими перевагами ідеї перед конкурентами що складаються з багатьох компонентів є – простота, та низька ціна.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Ідея проекту: технологія полягає у нанесенні лазером багаторівневого рельєфу на резист що нанесений на германійове скло. Разом з його допомогою відбувається наближення об'єкта, а компенсацію спотворення забезпечує цифрова обробка на основі нейронних мереж. Виходячи з цих даних можна робити фото об'єкта в ІЧ діапазоні з покращеним зображенням.

Таблиця 4.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Об'єктив тепловізора	Об'єктив тепловізора з покращеним зображенням	Наявні, необхідно доробити	Малодоступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: об'єктив тепловізора з покращеним зображенням				

За результатами аналізу технологічного здійснення ідеї проекту, можемо зробити висновок, що реалізація проекту можлива.

Обрана технологія реалізації – Об'єктив тепловізора з покращеним зображенням

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проаналізуємо ринкові можливості для розуміння рентабельності нашого проекту. Перевіривши продажі головних гравців на ринку матимемо приблизні цифри для свого проекту.

Таблиця 4.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Невідомо
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Невідомо
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Як і в звичайних тепловізорах
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідомо

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту за попередньою характеристикою потенційного ринку стартап-проекту показав, що невідомо як ринок відреагує на появу даного приладу.

Потрібно бути клієнт-орієнтованими аби розуміти кому продавати наш продукт, тому для цього визначимо цільову аудиторію та її потреби.

Таблиця 4.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Своєчасне виявлення по сторонніх об'єктів	Військові Охоронні фірми	Ціна, результативність	Висока якість зображення, легкість користування

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту показала, що цільовою аудиторією є військові та охоронні фірми. Різна поведінка споживачів спричинена ціною та результативністю приладів. Дане виробництво можливо вивести на державний рівень.

Аби запобігти непередбачуваних ситуацій та зниженню продажів переглянемо фактори що можуть цьому завадити.

Таблиця 4.7. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Створення нових дешевих приладів	Створення конкурентами більш нових результативніших приладів	Розробка покращеної системи
2.	Вузька сфера застосування	Можливе падіння потреби через особливості використання	Пошук нових галузей застосування
3.	Небажання поновлювати вже існуючі системи	Небажання установами переобладнувати своє тех. забезпечення	Впровадити з продажем безкоштовне налаштування та сервіс
4.	Потреба в постійному людському аналізі	Сучасне ПЗ може повністю замінити людину у чужих проектах	Перехід на автоматичний пошук мін
5.	Зниження ціни конкурентами	Конкуренти можуть занизити свою ціну	Покращити якість приладу аби ціна була виправданою

Аналіз ринкового середовища показав фактори загроз, що можуть перешкодити впровадженню проекту, такими факторами є – конкуренти , що можуть занизити ціну на власні прилади та можливо винаходження нового або вдосконалення старого методу (або приладу).

Фактори можливостей потрібні нам аби розуміти масштаби виробництва та прибутку.

Таблиця 4.8. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба клієнтів в кращій якості зображення	Клієнти хочуть отримати більш кращу якість зображення	Вдосконалення
2	Винайдення простого та результативного методу	При оптимізації та аналізу методів можливе винайдення нового методу оптико-електронного позиціонування	Оптимізація запропонованого методу та аналіз існуючих
3	Можливість здешевлення методу	Великі об'єми виробництва	Збільшення об'єму виробництва
4	Вихід на міжнародний ринок	Можливість виходу на міжнародний ринок	Заробити собі ім'я на внутрішньому ринку та виходити на зв'язок з іноземними компаніями

Аналіз факторів можливостей показав, що поведінка споживачів може призвести до вдосконалення методу, виходу на міжнародний ринок, можливості використання новітніх технологій. Тому, є необхідність в подальшому шукати методи вдосконалення якості, аналіз існуючих та впровадження нових технологій

Проаналізувавши ринок конкуренції матимемо картину чи варто взагалі починати проект чи ні.

Таблиця 4.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
--------------------------------------	---	--

1.Монополістична конкуренція	Галузь конкурентоспроможна але існує кілька основних гравців	Щоб вийти на ринок необхідно довести що твій прилад кращий та дешевший
2. Внутрішньогалузева	Використовується в вузькій галузі	Перейти до інших галузей

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що відсутність авторитету ускладнює вихід на ринок. Але, мій товар є дешевим та має кращі характеристики, тому може конкурувати з існуючими компаніями. Для впровадження методу за кордон, необхідно стати кращим на ринку своєї країни.

Аби мати більш розгорнуту картину проведемо аналіз за М.Портером порівнявши мій прилад із головними конкурентами.

Таблиця 4.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	TESTO 868 Fluke TiS75	Затрати, ресурси та досвід	Кількість замовленої продукції	Кількість замовлень. Попит.	Ціна, лояльність споживачів
Висновки:	Більше спеціалізуються на іншому обладнанні	Є можливість входу в ринок за рахунок гучності цін та переваги у витрат Є потенційні конкуренти серед існуючих компаній	Постачальники не диктують умови роботи на ринку. Затримки під час встановлення та юстування спеціальних стендів.	Клієнти диктують наступні умови роботи на ринку: Якість. Висока вимірювальна точність МПФ та ДЕ	Обмеження для роботи на ринку через товари замінники Обмежують встановлення високих цін на метод

Конкуренти в галузі є легендарними, та мають авторитет, також великою проблемою виходу на ринок є великі фінансові затрати.

Визначимо якими характеристиками нашого товару ми зможемо конкурувати з аналогами інших виробників, задовольнивши потреби споживачів.

Таблиця 4.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреба споживачів	Військові та охоронні системи спостереження.
2	Простота в експлуатації	Легкий в експлуатації
3	Маркетинговий потенціал	Підвищена якість зображення
4	Вартість	Низька ціна
5.	Технічне обслуговування	Гарантія якості, гарантійне обслуговування

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності показало, що існує факт необхідності підвищення впізнаваності (авторитету) на ринку.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін дасть нам можливість зрозуміти на яких факторах потрібно зробити акцент.

Таблиця 4.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з TESTO 868						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	16		+		+			
2	Велика кількість постачальників	15					+		
3	Висока якість	17					+		
4	Технічне обслуговування	18							+
5.	Ціна	15							+

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін показав, що фактор конкурентоспроможності нашого проекту сильніший ніж Testo 868. Сильними факторами конкурентоспроможності можна віднести – ціну, обслуговування та якість.

На основі попередніх таблиць зробимо SWOT-аналіз.

Таблиця 4.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Дешевизна 2. Простота 3. Якість 	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Відсутність авторитету на ринку</p>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вихід на міжнародний ринок. 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг. 3. Розширення ринку за рахунок іноземних замовників. 4. Підвищення якості обслуговування клієнтів для знаходження нових потенційних клієнтів. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Політичні та економічні ризики ведення бізнесу;

Ринкові загрози і ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу чинників, і, на відміну від них, ще не реалізованими, мають певну імовірність здійснення.

Тому: зниження доходів потенційних підприємств - фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі методу і відповідно - цінової конкуренції.

Обґрунтуємо усі фактори конкурентоспроможності для більш чіткого плану дій в подальшій реалізації.

Таблиця 4.14. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2	Ціна та собівартість	Рівень цін повинен бути менший ніж ціни

	продукції	конкурентів
3	Точність	Точність має бути не меншою ніж у конкурентів
4	Маркетинговий потенціал	Створити гарний імідж компанії
5	Простота експлуатації	Метод повинен бути простим у використанні для будь-яких користувачів
6	Технічне обслуговування	Міжнародна технічна допомога та обслуговування клієнтів
7	Безпечність	Рівень безпечності має бути не меншим ніж у конкурентів

Результат обґрунтування факторів конкурентоспроможності показав, що існує фактор потреби споживачів, який обумовлює необхідність розробки проекту. Цей проект повинен конкурувати в ціні та бути безпечним, точним, а також вийти на міжнародний рівень.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів

Таблиця 4.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військові , Охоронні фірми	Мати відносно гарну якість зображення за низьку ціну	Високий попит на ринку	Мала	Легко
Які цільові групи обрано: Військових та охоронні фірми					

Військових та охоронні фірми було обрано за цільові, через легкість входу у сегмент, через те що в цих групах достатньо великий попит та необхідність використання високоякісних та точних тепловізорів для отримання точної інформації про об'єкти спостереження. Але не зважаючи на

«імениту» конкуренцію, все рівно є шанси захопити цей сегмент потенційних клієнтів. Виходячи з стратегії охоплення ринку, можемо стверджувати, що компанія працює із всім ринком.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Належна якість	Наростаюча	Невисока ціна, бренд	Диференціація

Реалізація цієї стратегії вимагає, як правило, більш високих витрат. Проте успішна диференціація дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

Наступний крок – визначення стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 4.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Так	Забирати існуючих у конкурентів	Буде здійснено покращення існуючих методів, а також приладів	Стратегія заняття конкурентної ніші

			для відповідних цілей	
--	--	--	--------------------------	--

Ніша, для того, щоб вона була привабливою для компанії, повинна задовольняти умовам:

- бути досить прибутковою, щоб робити доцільним процес виробництва і обслуговування;
- залишатися стабільною упродовж тривалого проміжку часу;
- має бути добре захищеною юридично;
- бути непривабливою для конкурентів;
- відповідати цілям і ресурсам компанії, її специфічним можливостям.

Беручи до уваги вимоги споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування. що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 4.18. Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Висока точність, адійність	Стратегія диференціації	Тепловізор з високококурентною точністю	Точність, надійність, якість.

Отже наш продукт буде доступний для кожного, з низькою ціною, малими габаритами та вагою. Розвиток буде проводитися по стратегії диференціації.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Отримання максимальної інформації про об'єкт спостереження	Висока якість зображення	Якість зображення вища за конкурентів
2	Зручність	Малі габарити та вага	Менший та легший

Формування маркетингової концепції товару показала, що для підприємств у яких буде впроваджений даний стартап-проект буде задовольнятися потребам у легкості, малих розмірах та високій якості зображення що буде цікаво військовим.

Зробимо підрахунок початкових витрат проекту маючи інформацію про необхідне нам обладнання, персонал та рекламу щоб було легше знайти інвестора.

Таблиця 4.20. Початкові витрати проекту

№ з/п	Стаття витрат	Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.
1.	Розробка проектних матеріалів	100
2.	Робоче проектування і прив'язка проекту	100
3.	Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв	750
4.	Витрати на приймально-здавальні випробування	25
5.	Витрати на придбання нематеріальних активів	70
6.	Оплата юридичних послуг	20
7.	Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі	20
8.	Витрати, пов'язані формуванням команди	80
Разом		1165

При підрахунках початкових витрат проекту ми з'ясували щоб почати реалізовувати його нам необхідно 1млн 165 тис грн.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.21. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	-	1.5-3 тис \$	10 тис \$	1.1-1.5 тис \$

При визначенні меж встановлення ціни з'ясувалося, що рівень доходів цільової групи споживачів складає приблизно 1 тис. \$, товари-замінники – відсутні, аналоги – 1.5-3 тис \$, верхня та нижня межа встановлення ціни на товар складає 1.1-1.5 тис. \$, що дає перевагу над товарами-аналогами.

Далі визначимо оптимальну системи збуту, в межах якої приймається рішення:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників

Таблиця 4.22. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	На сьогоднішній день споживачі купують продукт безпосередньо у магазинах	Встановлення контактів зі споживачами	Канал нульового ріння (виробник безпосередньо продає товару	Збут продукції відбувається шляхом виставлення продукції на

	техніки		клієнту)	спеціальних виставка
--	---------	--	----------	-------------------------

Робимо висновки що нам необхідно залучати посередників, як оптових так і роздрібних продавців аби зробити товар легко доступним.

Останньою складової маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів.

Таблиця 4.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти дізнаються про нові продукції з наукових публікацій та патентів, з сайту розробника, по рекомендаціях та наукових виставок	Конференції та виставки, Інтернет	SMM, маркетинг	Представлення товару, його позиціонування з метою залучення клієнтів	«Ваші очі не повірять в таку якість зображення»

Концепція маркетингових комунікацій показала, для того щоб популяризувати власну продукцію необхідно рекламувати її серед популярних людей в соцмережах, та таргетінг реклама по різних джерелах. Завданням рекламного повідомлення має стати представлення товару відповідній аудиторії (підприємств).

Висновки до розділу 4

Виконавши загальний аналіз реалізації ідеї стартап-проекту з дифракційною лінзою що замінить телеоб'єктив, можна зробити загальні висновки.

Попит на продукцію в нашій країні доволі великий, через війну. Тепловізори з об'єктивами що суттєво покращують зображення стануть в нагоді військовим для того щоб слідкувати за ворогом або своєчасно помітити його в момент обмеження зорової активності. Після розрахунку та виробництва дифракційної лінзи для гібридних ІЧ-об'єктивів їх необхідно атестувати на якість і саме на цій завершальній стадії виробництва.

Конкуренція на ринку України в області тепловізорів, є досить великою, адже вже є монополісти в цій області. А ось для тих хто виготовляє об'єктиви конкуренція вільна. Специфіка цієї сфери потребує високої якості зображення, що робить вихід на ринок ще більш можливим.

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно запропонувати (продавати) її конкурентам, адже виготовлення об'єктивів з рефракційно-дифракційною ОС, є дуже капіталовмістким. Подальша імплементація є доцільною, оскільки технології та проекти в тепловізійних систем надвичайно важливі та грають велику роль у військовому та охоронному приладобудівництві.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерського дипломного проекту було отримано теоретичне та експериментальне підтвердження переваг застосування не параксіальних дифракційних лінз, чим вдалося зменшити кількість сферичних поверхонь інфрачервоної системи та підвищити якість її зображення через зменшення показників оптичних аберацій. Це дає можливість покращити розрахунки ДОЕ в оптичних системах.

Теоретичне підтвердження було отримано внаслідок компонування інфрачервоних рефракційно-дифракційних ОС. Підвищення якості зображення даних ОС є можливим при використанні непараксіальних ДЛ із заданими оптичними характеристиками, котрі за рахунок від'ємного показника сферичної аберації мають можливість формувати корекцію сферичних аберацій всієї ОС.

Експериментальне підтвердження було отримано шляхом заміни рефракційного елементу в ІЧ-об'єктиві на компенсуючий дифракційний та порівнянням їх діаграм аберацій. Розраховано мікропрофіль БПДЛ параксіальним та непараксіальним методами та виконано їх порівняння.

У роботі також представлено новий метод розрахунку дифракційної лінзи. Було підтверджено, що ДОЕ, розрахований за допомогою запропонованого методу, має вищу якість зображення за рахунок зменшення сферичної аберації.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження можна розглядати як доведення потрібності використання дифракційних лінз в оптичних системах на прикладі інфрачервоного об'єктива для покращення зображення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шредер Г. Техническая оптика [Текст] / Г. Шредер, Х. Трайберх. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
2. [https://uk.wikipedia.org/wiki/ Дифракційна_ґратка](https://uk.wikipedia.org/wiki/Дифракційна_ґратка)
3. Сисакян И.Н., Шорин В.П., Сойфер В.А., Мордасов В.И., Попов В.В. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов / Компьютерная оптика 1988 – 74-78 с.
4. Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Компьютерная оптика. Достижения и проблемы
5. Колобродов В.Г. Дифракційна теорія оптичних систем: підручник [Текст] / В.Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 148 с.
6. Полещук А. Г. Применение дифракционной оптики в измерительной технике [Текст] / А. Г. Полещук , В. П. Коронкевич, В. П. Корольков, А. Г. Седухин // Компьютерная оптика, 2002. – №22. – С. 86-95.
7. Колобродов В.Г. Проектування дифракційних оптичних елементів і систем: підручник [Текст] / В.Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ „КПІ”, 2013. – 194 с.
8. Грейсух Г. И. Оптика градиентных и дифракционных элементов [Текст] / Г.И. Грейсух, И.М. Ефименко, С.А. Степанов. – М.: Радио и связь, 1990.– 136 с.
9. Бобров С.Т. Оптика дифракционных элементов и систем [Текст] / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
10. Грейсух Г.И. Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Компьютерная оптика, 2005. – Вып. 28. – С. 60-65.
11. Faklis D. Spectral properties of multiorder diffractive lenses [Текст] / D. Faklis, G.M. Morris // Appl.Opt., 1995. – No.34(14). – P. 2462-2467.
12. Kovalenko A.I. Study of the chromatic properties of harmonic diffractive lens [Текст] / A. I. Kovalenko // Proceedings of Information Technology and Nanotechnology (ITNT2015), CEUR Workshop Proceedings, 2015. – No.1490. – P. 61-68.
13. Lou D. Application and Research of Harmonic Diffractive/Refractive Optics in Visible Spectrum [Текст] / D.Lou, J.Bai, X.Hou, G.Yang // Proceedings of SPIE. – 2005. – Vol.5636, – P.78-85..
14. Fan C.-J. Design of Infrared Inverted Telephoto-Optical System with Double-Layer Harmonic Diffractive Element [Текст] / C.-J. Fan, Z.-Q. Wang, L. Lin, M. Zhang // Chi.Phys.Lett, 2007. – Vol.24, No. 7.

- 15.Хомутов В.Н. Измерение дифракционной эффективности ДОЭ по многим порядкам дифракции [Текст] / В.Н. Хомутов, А.Г. Полещук, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 2011. – Т.35, №2. - С.196-202. 170
- 16.Інструкція Zemax [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>
- 17.Коронкевич В.П. Точность изготовления дифракционных оптических элементов лазерными записывающими системами с круговым сканированием [Текст] / В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук, А.А. Харисов, В.В. Черкашин // Компьютерная оптика. – 1997. – №17. – С. 63-74.
- 18.Методы компьютерной оптики [Текст] / под. ред. В. А. Сойфера: Учеб. Для вузов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 688 с.
- 19.О’Shea D. C. Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test [Текст] / D.C О’Shea, T. J. Suleski, A. D. Kathman, D. W. Prather. – Washington: SPIE-Press, 2004. – 254 p.
- 20.Кучугура І. О. Розробка методу розрахунку дифракційних лінз [Текст] / І.О.Кучугура, В.Г. Колобродов, // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011.– №5. – С.115-119.
- 21.Колобродов В.Г. Прикладна дифракційна оптика: підручник [Текст] / В.Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – К.: НТУУ „КПІ”, 2014. – 312 с.
- 22.Котляр В.В. Формирователи волновых фронтов [Текст] / В.В.Котляр, С.В.Филиппов // Письма в ЖТФ, 1993. – Т.19, Вып.18. – С.5-9.
23. Колобродов В. Г. Інфрачервона гібридна лінза з виправленою сферичною аберацією / В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Є. А. Сірий // Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал. – 2013. – № 6(92). – С. 78–81.
- 24.Минин И.В. Конформная дифракционная квазиоптика: от миллиметровых волн до фокусировки ударных волн [Текст] / И.В. Минин, О.В. Минин // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2012. – №2. – С.257-261.
- 25.Burralli D. A. Optical performance of holographic kinoforms [Текст]/ D. A. Burralli, G.M. Morris, J. R. Rogers. / Appl.opt, 1989. – № 5, Vol. 28 – P. 976–983.
- 26..Інтегралы и ряды. Том 2. Специальные функции. 2-е издание [Текст] / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: ФМЛ. – 2003. - 752 с.
- 27.Максутов Д.Д. Астрономическая оптика [Текст] / Д.Д. Максутов. – Л.: Наука, 1979. – 395 с. 167
- 28.Rossi M. Refractive and diffractive properties of planar micro-optical elements [Текст] / M. Rossi, R. E. Kunz, H. P. Herzig // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34, No.26. – P. 5996– 6007.

- 29.Васильковська І. О. Розрахунок хроматичної аберації дифракційно-рефракційної лінзи з багатопорядковим мікрорельєфом [Текст] / І. О. Васильковська // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (15-16 травня 2018). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. – Київ, 2018. – С. 40-41.
- 30.Дифракционная компьютерная оптика [Текст] / под. ред. В. А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 736 с.
- 31.Сірий Є.А. Дифракційні оптичні елементи для інфрачервоної оптики: дис. кандидата техн. наук: 05.11.07 [Текст] / Сірий Євгеній Анатолійович. – К., 2015. – 165
- 32.Кучугура І. О. Метод оцінки модуляційної передавальної функції трифокальної інтраокулярної лінзи [Текст] / В.Г. Колобродов, І.О. Кучугура, В. І. Микитенко, Є.А. Сірий // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – №2. – С.99–102.
- 33.Кучугура І.О. Комп'ютерне проектування дифракційних лінз [Текст] / І.О. Кучугура, В.Г. Колобродов // VI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (23-24 квітня 2013). Збірник тез доповідей. – Київ, 2013. – С. 40.
- 34.Кучугура И.О. Итерационный метод компьютерного проектирования дифракционных линз [Текст] / И.О. Кучугура, В.Г. Колобродов// Материалы 6-й Международной студенческой научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения». Сборник тезисов докладов. – Минск, 2013. – С.188.
- 35.Sohn J.S. Design and fabrication of diffractive optical elements by use of gray-scale photolithography [Текст] / J.S. Sohn, M.B. Lee, W.C.Kim, E.H. Cho et al. // Applied Optics. – 2005. – Vol.44, No.4. – P. 506-511. .
- 36.Smith W. J. Modern lens design / W. J. Smith. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 472 p.
- 37.ЧікідаО.І. Перспективні дифракційні технології / І. О. Вовчок, О. І. Чікіда. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 67–69.
- 38.2. Чікіда О.І. Сучасний стан ринку дифракційних лінз / О. І. Чікіда, І. О. Вовчок. // XX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні». Матеріали конференції. – Київ, 2019. – С. 92–94.